

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE MONTES

PROYECTO FIN DE CARRERA



Influencia de la humedad de la madera en la evaluación de las propiedades mecánicas del pino silvestre mediante técnicas no destructivas

Autor

Jaime de la Mata Jiménez

Directores

Guillermo Íñiguez González

Miguel Esteban Herrero

Madrid, diciembre de 2011

Influencia de la humedad de la madera en la evaluación de las
propiedades mecánicas del pino silvestre mediante técnicas no
destructivas

AUTOR

Jaime de la Mata Jiménez

DIRECTOR

Guillermo Íñiguez González

DIRECTOR

Miguel Esteban Herrero

Bº Vº

Bº Vº

Diciembre de 2011

Título del P.F.C.: Influencia de la humedad de la madera en la evaluación de las propiedades mecánicas del pino silvestre mediante técnicas no destructivas.

Autor: Jaime de la Mata Jiménez

Director/es: Guillermo Íñiguez González y Miguel Esteban Herrero

Tribunal:

PRESIDENTE

VOCAL

SECRETARIO

Fdo.:

Fdo.:

Fdo.:

CALIFICACIÓN:

Fecha: Madrid,

OBSERVACIONES:

RESUMEN

Título: Influencia de la humedad de la madera en la evaluación de las propiedades mecánicas del pino silvestre mediante técnicas no destructivas.

Autor: Jaime de la Mata Jiménez

Director/es: Guillermo Íñiguez González y Miguel Esteban Herrero

Departamento: Construcción y vías rurales

El presente Proyecto Fin de Carrera estudia la influencia que tiene el contenido de humedad de la madera en la evaluación de sus propiedades mecánicas mediante ensayos no destructivos (END), llevados a cabo mediante métodos acústicos y análisis de vibración, analizando y comparando los valores obtenidos. Actualmente, las técnicas no destructivas son métodos muy usados en la evaluación de materiales maderables.

Para ello, se seleccionan 26 probetas de madera aserrada de pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) cuya procedencia es El Espinar, Segovia, con una dimensión nominal de 3000 mm x 150 mm x 100 mm. Posteriormente se trasladan al laboratorio de maderas del CIFOR – INIA, donde van a permanecer a medida que se van secando.

Se clasifica visualmente el lote a medida que se produce su secado según la norma UNE 565444: 2009, observando la evolución de las probetas, referente a las clases visuales, a lo largo del proceso.

El contenido de humedad se determina a través del método de la resistencia eléctrica de la madera según la norma española UNE- EN 13183-2: 2002, haciendo uso de diferentes tipos de electrodos previamente introducidos en las probetas. Este método es el más común en la determinación del contenido de humedad de la madera en aserradero o puesta en obra.

A medida que transcurre el proceso de secado se miden las diferentes variables relacionadas con el contenido de humedad y con las técnicas END: al principio la pérdida de humedad es más rápida y las mediciones son más frecuentes y, posteriormente, el espaciamiento entre días de medición es mayor.

Una vez que la madera alcanza el contenido de humedad de equilibrio se procede a ensayar a flexión, cuyos resultados se comparan con los END, para ver si es posible predecir el comportamiento mecánico de la madera a través de estas últimas. Resultan buenos coeficientes de correlación en módulo de elasticidad (R^2 de 0,71 para onda ultrasónica, 0,67 para onda sónica y 0,81 para el análisis de vibraciones).

ABSTRACT

Title: Influence of wood moisture content in the evaluation of the mechanical properties of Scots pine by non-destructive techniques.

Author: Jaime de la Mata Jiménez

Director: Guillermo Íñiguez González y Miguel Esteban Herrero

Department: Construction and rural roads

This Project for the final degree in Forest Engineering at the Polytechnic University of Madrid studies the influence of the moisture content of wood in the evaluation of mechanical properties timber by nondestructive testing (NDT). Acoustic and vibration analysis were carried out, along with subsequent analysis and comparison of values obtained. Non Destructive Testing is a very useful method for testing wood materials.

To do this, a sample of 26 trunks of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) was selected from the forest of El Espinar (Segovia, Spain), with an approximate size of 3000 x 150 x 100 mm. The timber was then transported to the wood laboratory CIFOR - INIA, where it remained while it dried.

During the drying process, the wood batch is classified visually according to UNE standard 565444: 2007, observing the way visual classes of samples evolved.

The moisture content is determined by the electrical resistance method according standard EN 13183-2: 2002, using different types of electrodes previously introduced into the specimens. This method is the one most normally used for determining moisture content in structural wood.

During the drying process, variables related to moisture content and NDT techniques were measured. At the start, the moisture content loss was faster and the measurements more frequent, and then the spacing between measurement days increased.

Once the wood reached equilibrium moisture content, the bending test was applied to the wood. The results of this test were compared with NDT in order to ascertain whether or not it is possible to predict the mechanics of wood behavior by means of NDT. Correlations between the elastic modulus of different techniques were significant (R-squared of .71 for ultrasonic wave, .67 for sonic waves and .81 for vibration analysis).

AGRADECIMIENTOS

Son muchas las personas a las que agradecer la posibilidad de haber terminado el presente proyecto fin de carrera.

En primer lugar, agradecer al laboratorio de maderas del INIA, por permitirme el acceso a sus instalaciones y proporcionarme todos los equipos que he necesitado. Fundamentalmente agradecer a todo el personal que trabaja allí, por resolverme la gran cantidad de dudas que surgen a lo largo del tiempo. Sin todo ello hubiera sido imposible llevar a cabo este estudio.

Agradezco a todos los profesores de la Unidad Docente de Cálculo de Estructuras de la E.T.S.I. de Montes de la UPM, haberme dado la posibilidad de haber realizado mi proyecto fin de carrera con ellos, así como sus continuos comentarios y sugerencias realizadas durante el mismo.

A María José Montero García-Andrade, compañera de medición durante los ensayos de técnicas no destructivas, por acompañarme en todo momento y ser la persona que me ha enseñado a utilizar los equipos y Daniel Fernández Llana, quien me ayudó a realizar los ensayos a flexión de las piezas de madera.

Finalmente a todos mis compañeros, con los que he compartido todos estos años en la escuela, así como a mi familia, por su apoyo y paciencia constante.

**ÍNDICE**

| | Pág. |
|--|------|
| ÍNDICE | I |
| Índice de figuras | IV |
| Índice de tablas | IX |
| | |
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| | |
| 2. OBJETIVOS | 3 |
| | |
| 3. ANTECEDENTES | 4 |
| 3.1 La madera | 4 |
| 3.2 La especie | 4 |
| 3.3 Propiedades físicas de la madera | 7 |
| 3.3.1 Anisotropía | 7 |
| 3.3.2 Contenido de humedad de la madera | 7 |
| 3.4 Propiedades mecánicas relacionadas con el contenido de humedad | 12 |
| 3.5 Defectos o singularidades relacionadas con la humedad | 14 |
| 3.6 Medida del contenido de humedad | 16 |
| 3.6.1 Método gravimétrico | 16 |
| 3.6.2 Métodos eléctricos | 17 |
| 3.7 Técnicas no destructivas | 21 |
| 3.7.1 Inspección visual | 23 |
| 3.7.2 Métodos acústicos | 24 |
| 3.7.3 Análisis de vibración | 29 |
| 3.7.4 Métodos electromagnéticos | 30 |



| | | |
|-----------|---|-----------|
| 3.7.5 | Métodos mecánicos..... | 37 |
| 3.8 | Métodos destructivos. Ensayo a flexión..... | 42 |
| 4. | MEDIOS Y EQUIPOS UTILIZADOS | 46 |
| 4.1 | Instalaciones..... | 46 |
| 4.2 | Clasificación visual y preparación del material de ensayo | 46 |
| 4.3 | Contenido de humedad..... | 47 |
| 4.4 | Equipo de medición de onda acústica | 50 |
| 4.5 | Análisis de vibraciones | 52 |
| 4.6 | Ensayo a flexión..... | 53 |
| 5. | METODOLOGÍA..... | 55 |
| 5.1 | Material de ensayo | 55 |
| 5.2 | Desarrollo experimental | 56 |
| 5.2.1 | Clasificación visual..... | 56 |
| 5.2.2 | Preparación del material | 59 |
| 5.2.3 | Medición con equipos basados en métodos acústicos | 63 |
| 5.2.4 | Medición del contenido de humedad | 65 |
| 5.2.5 | Análisis de vibración | 69 |
| 5.2.6 | Formación de una nueva pila | 71 |
| 5.2.7 | Preparación del material para los ensayos a flexión | 73 |
| 5.2.8 | Ensayos a flexión | 74 |
| 6. | ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS | 80 |
| 6.1 | Contenido de humedad..... | 80 |
| 6.2 | Clasificación visual | 85 |
| 6.3 | Merma | 87 |



| | | |
|-----------|--|------------|
| 6.4 | Velocidad de propagación..... | 90 |
| 6.4.1 | Evolución de la velocidad de propagación con el contenido de humedad | 90 |
| 6.4.2 | Relación de la velocidad para dos contenidos de humedad diferentes | 97 |
| 6.5 | Ensayo a flexión frente a técnicas no destructivas..... | 101 |
| 6.5.1 | Modulo de elasticidad global..... | 101 |
| 6.5.2 | Módulo de elasticidad local frente al módulo de elasticidad global.. | 103 |
| 6.5.3 | Resistencia a flexión (MOR) | 104 |
| 6.6 | Evolución de las clases resistentes asignadas por PLG | 105 |
| 7. | CONCLUSIONES | 108 |
| 8. | BIBLIOGRAFÍA | 110 |
| 9. | ANEXOS | 114 |
| | Anexo A. Estadillo para la clasificación visual, TND y ensayo de flexión | 114 |
| | Anexo B. Estadillo de humedad..... | 116 |
| | Anexo C. Símbolos utilizados..... | 117 |
| | Anexo D. Análisis de la varianza (ANOVA) de las diferentes variables | 119 |
| | Anexo E. Datos obtenidos..... | 129 |
| | Contenido de humedad | 129 |
| | Velocidad de propagación y de vibración | 138 |
| | Masa de las probetas..... | 145 |
| | Tabla de valores medios | 147 |
| | Ensayo a flexión | 148 |



Índice de figuras

Capítulo 3. Antecedentes

| | |
|---|----|
| Figura 3.1 Distribución del pino silvestre en la Península Ibérica | 5 |
| Figura 3.2 Principales direcciones de la madera (Vignote, 2006) | 7 |
| Figura 3.3 Interacciones existentes entre la madera y la atmósfera..... | 9 |
| Figura 3.4 Estados de la madera en función de su contenido de humedad..... | 10 |
| Figura 3.5 Gráfico en tres dimensiones de temperatura, humedad relativa y contenido de humedad de equilibrio..... | 12 |
| Figura 3.6 Esfuerzo de compresión | 13 |
| Figura 3.7 Esfuerzo de tracción | 13 |
| Figura 3.8 Esfuerzo de flexión..... | 13 |
| Figura 3.9 Hendibilidad | 14 |
| Figura 3.10 Esfuerzos de secado (Joly, P.; More-Chevalier, F. 1980) | 15 |
| Figura 3.11 Perforaciones realizadas con xilohigrómetro de resistencia eléctrica | 18 |
| Figura 3.12 Conductividad eléctrica en función de la humedad de la madera (Stamm, A. J.)..... | 19 |
| Figura 3.13 Variación de la constante dieléctrica en unción del contenido de humedad..... | 20 |
| Figura 3.14 Xilohigrómetro de resistencia eléctrica (derecha) y xilohigrómetro capacitativo (izquierda)..... | 21 |
| Figura 3.15 Trayectoria seguida por la onda en madera sana y en madera con vacío o pudrición (FAKOPP) | 25 |
| Figura 3.16 Atenuación de la señal ultrasónica | 28 |
| Figura 3.17 Principio de funcionamiento de la tomografía acústica | 29 |
| Figura 3.18 Esquema del funcionamiento de los métodos electromagnéticos | 31 |
| Figura 3.19 Inspección termográfica de un techo de madera con infiltraciones de agua..... | 32 |
| Figura 3.20 Esquema del sistema de funcionamiento de la radiación microondas ... | 33 |
| Figura 3.21 Comparación de dos radargramas de madera sana y madera con defectos (Butnor et al, 2009)..... | 34 |



| | |
|---|----|
| Figura 3.22 Sección transversal de una troza de madera vista mediante tomografía computarizada | 35 |
| Figura 3.23 Radiografía | 36 |
| Figura 3.24 Esquema de la máquina Computermatic | 38 |
| Figura 3.25 Pilodyn..... | 40 |
| Figura 3.26 Utilización del resistógrafo en arboles vivos y en estructuras de madera | 41 |
| Figura 3.27 Extractor de tornillos (izquierda) y tornillos de 3, 4 y 5 mm utilizados en la extracción de tornillos (derecha)..... | 41 |
| Figura 3.28 Gráfico de carga - deformación para la madera | 42 |
| Figura 3.29 Alargamiento y contracción de las fibras | 43 |
| Figura 3.30 Diagramas de esfuerzos de una pieza a ensayar | 44 |
| Figura 3.31 Ejes del módulo de resistencia | 44 |
| Figura 3.32 Diagrama de tensiones normales (σ) en una sección transversal de una pieza sometida a flexión | 45 |

Capítulo 4. Medios y equipos utilizados

| | |
|--|----|
| Figura 4.1 Instrumentos utilizados para la clasificación visual y la preparación de las probetas | 47 |
| Figura 4.2 Xilohigrómetro | 48 |
| Figura 4.3 Par de puntas de electrodo aisladas | 49 |
| Figura 4.4 Pinzas utilizadas que se acoplan a los electrodos introducidos en la madera..... | 50 |
| Figura 4.5 Equipo Sylvatest © Trio | 51 |
| Figura 4.6 Equipo Microsecond Timer | 52 |
| Figura 4.7 Ensayo de una probeta con el equipo Portable Lumber Grader | 53 |
| Figura 4.8 Pórtico de ensayos a flexión Ibertest PFIB 600-300W | 54 |
| Figura 4.9 Extensómetros HBM WA de 20 y 50 mm | 54 |

Capítulo 5. Metodología

| | |
|---|----|
| Figura 5.1 Probeta de ensayo con sus dimensiones nominales..... | 55 |
| Figura 5.2 Detalle de la pila..... | 56 |



| | |
|--|----|
| Figura 5.3 Probetas dispuestas en el aserradero previamente a su selección visual .. | 57 |
| Figura 5.4 Detalle de los orificios realizados en una de las testas para la medida de los ultrasonidos | 60 |
| Figura 5.5 Los electrodos se clavan a la profundidad de 1/3 ó 2/3 de "b" | 61 |
| Figura 5.6 Detalle de los diferentes tipos de electrodos introducidos en la madera (medidas en mm) | 62 |
| Figura 5.7 Equipo Sylvatest Trio con los transductores colocados en cada testa..... | 63 |
| Figura 5.8 Equipo Microsecond Timer con los transductores colocados en cada testa | 64 |
| Figura 5.9 Trayectorias de cada medición con cada equipo acústico | 64 |
| Figura 5.10 Medida del contenido de humedad de una probeta a través del xilohigrómetro con martillo (HX)..... | 66 |
| Figura 5.11 Medida del contenido de humedad de una probeta a través de electrodos clavados en ésta. A la izquierda HT y a la derecha HC..... | 66 |
| Figura 5.12 Punta aislada y tirafondo con sus zonas aislantes y conductoras | 67 |
| Figura 5.13 Electrodos clavados en la probeta reflejándose, mediante la línea roja, la parte conductora de éstos | 68 |
| Figura 5.14 Equipo Portable Lumber Grader con sus diferentes componentes..... | 69 |
| Figura 5.15 Detalle de la balanza y el micrófono del equipo | 70 |
| Figura 5.16 Formación de una nueva pila..... | 71 |
| Figura 5.17 Preparación de la probeta antes del ensayo a flexión | 73 |
| Figura 5.18 Grafico de carga-deformación dentro de los márgenes de deformación elástica (Norma UNE-EN 408)..... | 75 |
| Figura 5.19 Determinación de MOE local. Distancia entre los apoyos..... | 76 |
| Figura 5.20 Detalle de la colocación de los extensómetros | 77 |
| Figura 5.21 Determinación del MOE global. Distancia entre los apoyos, dimensiones en mm | 77 |
| Figura 5.22 Software para el ensayo a flexión..... | 79 |

Capítulo 6. Análisis y discusión de resultados

| | |
|--|----|
| Figura 6.1 Evolución del contenido de humedad de las probetas con el paso del tiempo | 80 |
|--|----|



| | |
|--|----|
| Figura 6.2 Medidas de contenido de humedad (HX) de las 26 probetas en todos los días de medición | 81 |
| Figura 6.3 Gráfico de medias del análisis de la varianza para la variable contenido de humedad en valores próximos a la de saturación de la fibra | 82 |
| Figura 6.4 Gráfico de medias del análisis de la varianza para la variable contenido de humedad en valores próximos al 20%, con sus intervalos de confianza | 83 |
| Figura 6.5 Gráfico de medias del análisis de la varianza para la variable contenido de humedad en valores próximos al 12%, con sus intervalos de confianza | 84 |
| Figura 6.6 Proporción de piezas rechazadas por causa en cada clasificación visual. 86 | |
| Figura 6.7 Defectos que aparecen a medida que las probetas pierden contenido de humedad. Alabeo (izquierda) y curvatura en cara (derecha) | 86 |
| Figura 6.8 Merma producida en la cara (izquierda) y el canto (derecha) de las probetas durante el proceso de secado | 88 |
| Figura 6.9 Evolución del peso medio de las probetas a lo largo de su secado | 89 |
| Figura 6.10 Relación lineal entre el contenido de humedad y el peso de las probetas | 89 |
| Figura 6.11 Relación lineal entre el contenido de humedad y la densidad de las probetas | 90 |
| Figura 6.12 Evolución de las medias de la variable velocidad de propagación o vibración a lo largo del proceso de secado | 91 |
| Figura 6.13 Gráfico de medias del análisis de la varianza de la velocidad de propagación en valores próximos a la de saturación de la fibra | 92 |
| Figura 6.14 Gráfico de medias del análisis de la varianza para la velocidad de propagación en valores próximos al 20% | 92 |
| Figura 6.15 Gráfico de medias del análisis de la varianza para la velocidad de propagación en valores próximos al 12% | 93 |
| Figura 6.16 Relación entre el contenido de humedad (HX) y la velocidad de propagación..... | 95 |
| Figura 6.17 Relación entre el contenido de humedad (HT) y la velocidad de propagación..... | 95 |
| Figura 6.18 Relación entre el contenido de humedad (HC) y la velocidad de propagación..... | 95 |



| | |
|--|-----|
| Figura 6.19 Relación entre el contenido de humedad (HA) y la velocidad de propagación..... | 96 |
| Figura 6.20 Relación entre el contenido de humedad (HL) y la velocidad de propagación..... | 96 |
| Figura 6.21 Relación lineal entre la velocidad de propagación para dos contenidos de humedad diferentes (Sylvatest)..... | 98 |
| Figura 6.22 Relación lineal entre la velocidad de propagación para dos contenidos de humedad diferentes (MST) | 99 |
| Figura 6.23 Relación lineal entre la velocidad de propagación para dos contenidos de humedad diferentes (PLG)..... | 100 |
| Figura 6.24 Relación entre el MOE del ensayo a flexión y el determinado mediante NDT | 101 |
| Figura 6.25 Gráfico de medias del análisis de la varianza de la variable MOE, con sus intervalos de confianza | 102 |
| Figura 6.26 Relación lineal entre MOE local y MOE global | 103 |
| Figura 6.27 Relación entre la resistencia a flexión y el MOE determinado a través de NDT | 104 |
| Figura 6.28 Relación la resistencia a flexión y los MOE obtenidos en el ensayo a flexión | 105 |
| Figura 6.29 Número de probetas pertenecientes a cada clase resistente en tres momentos del proceso de secado | 106 |

Capítulo 9. Anexos

| | |
|--|-----|
| Figura 9.1 Función de distribución F..... | 121 |
| Figura 9.2 Gráfico de cajas y bigotes del contenido de humedad ($H \approx 30\%$) | 122 |
| Figura 9.3 Gráfica de cajas y bigotes del contenido de humedad ($H \approx 20\%$)..... | 123 |
| Figura 9.4 Gráfica de cajas y bigotes del contenido de humedad ($H \approx 12\%$) | 124 |
| Figura 9.5 Gráfico de cajas y bigotes de la velocidad de propagación ($H \approx 30\%$).. | 125 |
| Figura 9.6 Gráfico de cajas y bigotes de la velocidad de propagación ($H \approx 20\%$).. | 126 |
| Figura 9.7 Gráfico de cajas y bigotes de la velocidad de propagación ($H \approx 12\%$).. | 127 |
| Figura 9.8 Gráfico de cajas y bigotes del módulo de elasticidad determinado a través de diferentes métodos | 128 |



Índice de tablas

Capítulo 5. Metodología

| | |
|---|----|
| Tabla 5.1 Dimensiones reales iniciales las 26 probetas..... | 55 |
| Tabla 5.2 Especificaciones para la clasificación de piezas de sección rectangular con anchura $b > 70$ cm (Norma UNE-EN 56544: 2009)..... | 58 |

Capítulo 6. Análisis y discusión de resultados

| | |
|---|----|
| Tabla 6.1 Desviación típica, valor medio y coeficiente de variación del contenido de humedad en cada procedimiento, próximos al punto de saturación de la fibra | 82 |
| Tabla 6.2 Desviación típica, valor medio y coeficiente de variación del contenido de humedad en cada procedimiento, próximos al 20 % de contenido de humedad | 83 |
| Tabla 6.3 Desviación típica, valor medio y coeficiente de variación del contenido de humedad en cada procedimiento, próximos al 12 % de contenido de humedad | 83 |
| Tabla 6.4 Matriz de coeficientes de correlación para los diferentes procedimientos de medida de la humedad | 85 |
| Tabla 6.5 Números y porcentaje de piezas rechazadas según la norma de clasificación visual..... | 86 |
| Tabla 6.6 Reducción en las dimensiones de cara y canto durante el proceso de secado | 87 |
| Tabla 6.7 Desviación típica, valor medio y coeficiente de variación de la velocidad según cada equipo, en humedades próximas al punto de saturación de la fibra..... | 91 |
| Tabla 6.8 Desviación típica, valor medio y coeficiente de variación de la velocidad de propagación según cada equipo, en humedades próximas al 20% | 92 |
| Tabla 6.9 Desviación típica, valor medio y coeficiente de variación de la velocidad de propagación según cada equipo, en humedades próximas al 12 % | 93 |
| Tabla 6.10 Matriz de coeficientes de correlación para los diferentes equipos de medida de velocidad | 94 |
| Tabla 6.11 Relación lineal entre el contenido de humedad determinado a partir de diferentes procedimientos y la velocidad de propagación de los tres equipos | 97 |
| Tabla 6.12 % de velocidad que disminuye por cada % de MC que aumenta (Sylvatest) | 98 |



| | |
|---|-----|
| Tabla 6.13 % de velocidad que disminuye por cada % de MC que aumenta (MST) | 99 |
| Tabla 6.14 % de velocidad que disminuye por cada % de MC que aumenta (PLG) | 100 |
| Tabla 6.15 Variación existente entre MOE del ensayo a flexión y el MOE estimado mediante técnicas no destructivas | 101 |
| Tabla 6.16 Variación existente entre MOE global y MOE local | 103 |
| Tabla 6.17 Comparación entre el MOR y el MOE estimado mediante técnicas no destructivas | 104 |
| Tabla 6.18 Número de piezas pertenecientes a cada clase resistente en tres momentos del proceso de secado | 106 |

Capítulo 9. Anexos

| | |
|--|-----|
| Tabla 9.1 Análisis de la varianza del contenido de humedad a través de los diferentes procedimientos ($H \approx 30\%$)..... | 122 |
| Tabla 9.2 Análisis de la varianza del contenido de humedad a través de los diferentes procedimientos ($H \approx 20\%$)..... | 123 |
| Tabla 9.3 Análisis de la varianza del contenido de humedad a través de los diferentes procedimientos ($H \approx 12\%$)..... | 124 |
| Tabla 9.4 Análisis de la varianza de la velocidad de propagación para los tres equipos de medida ($H \approx 30\%$)..... | 125 |
| Tabla 9.5 Análisis de la varianza de la velocidad de propagación para los tres equipos de medida ($H \approx 20\%$)..... | 126 |
| Tabla 9.6 Análisis de la varianza de la velocidad de propagación para los tres equipos de medida ($H \approx 12\%$)..... | 127 |
| Tabla 9.7 Análisis de la varianza para la variable módulo de elasticidad | 128 |



1. INTRODUCCIÓN

La madera es un material natural, ligero y resistente, pero de propiedades mecánicas muy variables. El valor relativamente bajo de la densidad de la madera, en comparación con su resistencia y módulo de elasticidad, hace que sea un material especialmente adecuado para aplicaciones estructurales. Además, si comparamos la energía necesaria para la fabricación del material, el resultado de la relación entre rigidez y energía necesaria para la obtener el material es mucho más favorable para la madera. Por ello, las soluciones constructivas en madera resultan más ligeras que las de acero y mucho más que las de hormigón

Por otro lado, la madera es un material combustible aunque, en relación a su comportamiento frente al fuego, sus propiedades mecánicas no suelen verse afectadas con el paso de éste, como sí ocurre con los materiales.

Sin embargo, una característica importante de la madera es la higroscopicidad. Se trata de un material muy susceptible a los cambios de humedad, por lo que se originan una serie de fenómenos de consecuencias importantes como, por ejemplo, disminución de su resistencia mecánica o cambios dimensionales.

Los cambios dimensionales que se producen son importantes debido a que generan tensiones internas en la madera, que dan lugar a la aparición de curvaturas, alabeos o fendas. Por ello es un aspecto a tener en cuenta durante el proceso de secado de la madera.

La manera más habitual de medir el contenido de humedad de la madera es haciendo uso de sus propiedades eléctricas. Por ello, el método más empleado se basa en la relación inversa existente entre contenido de humedad y resistencia eléctrica. El método consiste en introducir dos electrodos en la madera y, mediante el uso de un xilohigrómetro, estimar el contenido de humedad basándose en su resistencia eléctrica. Para ello, se han utilizado electrodos con diferentes características y morfología.



Para la determinación de las propiedades físicas y mecánicas de la madera se pueden emplear numerosas técnicas tanto de carácter destructivo como no destructivo. En líneas generales, las técnicas no destructivas (TND) se caracterizan porque no alteran las propiedades del material ensayado mientras que las técnicas destructivas, como el ensayo a flexión, se caracterizan por dejarlo inutilizado.

Las técnicas no destructivas empleadas se basan en métodos acústicos que miden el tiempo que tarda una onda en propagarse a través de la madera y, por otro lado, en análisis de vibraciones que miden, entre otras cosas, la frecuencia natural de vibración de la pieza.

Se trata de técnicas muy interesantes y cada vez más utilizadas ya que, las que se basan en métodos acústicos, permiten evaluar madera estructural que se encuentra prestando un servicio sin que reciba daño alguno y deje de estarlo.

Esta relación existente entre el contenido de humedad de la madera y sus propiedades físicas y mecánicas hace que sea necesario estudiar la manera en la que se produce dicha variación de humedad con respecto como lo hacen sus propiedades físicas y mecánicas. Para ello, a lo largo del proceso de secado de la madera se miden las variables anteriormente descritas y se estudia la forma en la que evolucionan unas y otras.

Una vez que finaliza el proceso de secado de la madera y que alcanza el contenido de humedad de equilibrio se ensaya a flexión. Este ensayo consiste en posicionar las probetas sobre dos apoyos sometiénolas a una carga creciente y se obtienen variables relacionadas con el comportamiento de la madera en cuanto a resistencia y flexibilidad. Los resultados obtenidos mediante el ensayo a flexión se comparan con los determinados a través de las técnicas no destructivas.



2. OBJETIVOS

El objetivo principal del proyecto es estudiar el nivel y precisión de estimación de las técnicas no destructivas como predictores del comportamiento de la madera, en cuanto a la definición de sus propiedades mecánicas.

De ahí que los objetivos específicos que se pretenden estudiar sean los siguientes:

- Comparar los valores de contenido de humedad obtenidos mediante el empleo de diferentes métodos de medición a lo largo del secado natural de la madera y estudiar el motivo de las posibles diferencias encontradas.
- Establecer si la información determinada a través de los equipos que emplean técnicas no destructivas, y que se basan en metodologías diferentes, es semejante.
- Presentar relaciones estadísticas entre los parámetros relacionados con las técnicas no destructivas y el contenido de humedad, proporcionando coeficientes de corrección para dichos parámetros.
- Comprobar la existencia de algún tipo de relación entre el contenido de humedad de la madera y las propiedades físicas y mecánicas determinadas mediante el uso de técnicas no destructivas.
- Observar la manera en que evoluciona la madera, en términos de calidad visual, a lo largo del proceso de secado, con especial atención a los cambios dimensionales que sufre y la aparición de singularidades relacionadas con el secado.
- Estudiar las diferentes relaciones estadísticas entre las variables relativas a las técnicas no destructivas y las correspondientes a los ensayos mecánicos.



3. ANTECEDENTES

3.1 La madera

La madera es un conjunto de tejidos que forman el tronco de los árboles, así como sus ramas y raíces, constituida por una aglomeración de células de forma y longitud muy variables dependiendo de la función que desempeñen. No obstante, para generar madera, las plantas han de tener crecimiento secundario, es decir, que el crecimiento en diámetro se hace independiente al crecimiento longitudinal.

El uso de la madera se remonta a las primeras civilizaciones, ya que fue el primer material de construcción de que dispuso el hombre. Es el material de construcción más ligero, resistente y fácil de trabajar, tratándose de un recurso disponible en la naturaleza, que se encuentra de manera renovable siempre que su aprovechamiento y gestión sea sostenible.

Al principio las casas y otras construcciones de madera estaban realizadas con troncos de madera apilados horizontalmente y ensamblados en las esquinas. Sin embargo, cuando aparecieron los primeros aserraderos de madera, los constructores comenzaron a serrar los troncos por sus dos lados, para optimizar el uso de la materia prima y para estandarizar las medidas del material.

La madera aserrada es la forma más elemental de aprovechamiento del tronco. Se trata de madera maciza que se ha obtenido a través de la industria de primera transformación, es decir, solo se realizan procesos simples de transformación basados en el aserrado, secado y cepillado. Las piezas están generalmente escuadradas, con caras paralelas entre sí y cantos perpendiculares a las mismas.

3.2 La especie

El pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) también conocido como pino albar o pino de Valsaín, es un árbol elevado que puede llegar a los 30-40 m de altura. El porte



presenta grandes diferencias en cuanto a la silueta, según las condiciones de vida y la calidad de estación, ya que va deformándose y haciéndose más asimétrico con la edad.

El tronco es derecho, cilíndrico y recto, con ramificación escasa, que en las partes bajas desaparece por poda natural, quedando reducida al tercio superior. Todo esto hace que su madera tenga un valor alto desde un punto de vista estructural, ya que la escasez de nudos es notable.

En cuanto a su distribución, es el pino de área natural más extensa del mundo. Habita de manera natural en el hemisferio norte en Europa y Asia, en regiones templado – frías.

Las masas de pino silvestre de la península ibérica constituyen el límite suroccidental de su área de distribución mundial. En cuanto a la longitud geográfica se distribuye desde Gredos hasta las montañas del Cáucaso y a nivel latitudinal desde Sierra Nevada hasta Escandinavia.

En España sus masas principales se encuentran ubicadas en Pirineos, cordilleras Central e Ibérica (figura 3.1), siendo estas dos últimas las que han dado lugar a las denominaciones de origen, ampliamente extendidas en el comercio de la madera, como pino Valsain y pino Soria.

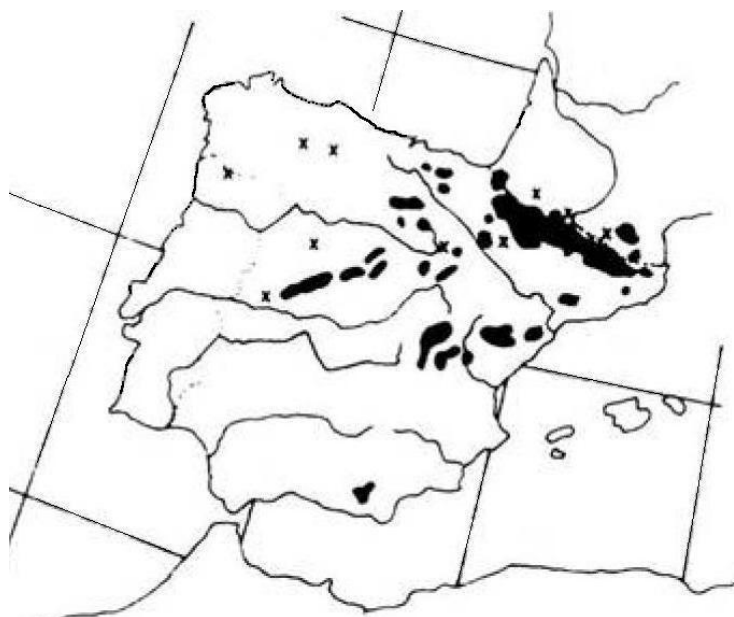


Figura 3.1 Distribución del pino silvestre en la Península Ibérica



La madera de esta especie es compacta, resinosa, con duramen grueso, rojo intenso y albura blanco-amarillenta. Los anillos de crecimiento están muy marcados debido a que la madera de invierno es mucho más densa. Las condiciones de clima, tipo de suelo, altitud y latitud influyen en la calidad de la madera más que en otros tipos de madera, ya que esas condiciones pueden variar mucho y tienen una gran influencia sobre la textura, la densidad y el tamaño de los nudos. Se seca con cierta rapidez, sin que se produzcan grandes depreciaciones si se tiene cuidado durante el proceso de secado.

Desde un punto de vista industrial, la madera de pino silvestre es la más apreciada de las coníferas españolas por su calidad y por la rectitud de sus fustes. Además, a pesar de ser una conífera, su leña es la más apreciada dentro de las pináceas.

Se trata de una madera que se mecaniza bien y fácilmente, tanto con herramientas manuales como con máquinas automáticas. Los acabados que se obtienen son muy limpios y suaves. No obstante, la calidad y la facilidad de su mecanizado dependen de las dimensiones de las piezas, del número de nudos y de la cantidad de resina que tengan. No presenta dificultades para su clavado y atornillado.

Los nombres comerciales más usuales son: Pino Norte, Pino Flandes, Pino Silvestre, Pino Nórdico, Pino Suecia y Pino Ruso.

En los siglos medievales, en las serranías ibéricas de España la madera de esta especie aparte de su construcción naval, estaba reservada a los nobles para la edificación y reparación de sus casas y palacios.

Actualmente, la principales aplicaciones son la construcción, carpintería, muebles, postes de la luz y de teléfonos, apeas de mina, pilares, tablero contrachapado, construcción de casas y piezas torneadas. Sus aplicaciones finales dependen de su crecimiento así como del tamaño y abundancia de singularidades o defectos que especifican las diferentes reglas de clasificación de una región o de un país.

Aunque se considere una madera no durable, se han encontrado casos puntuales con una excelente durabilidad, ya que aún se pueden encontrar casas y templos contruidos con rollos de esta especie en Noruega.



3.3 Propiedades físicas de la madera

La madera, como material de construcción, presenta una serie de propiedades características que en otros materiales tienen menos importancia.

3.3.1 Anisotropía

La madera es un material heterogéneo formado por fibras orientadas en una misma dirección, por lo que sus propiedades físicas y mecánicas no son iguales en cualquier dirección, si no que varían en función de la orientación en la que se aplique el esfuerzo.

Se consideran tres direcciones principales:

- Dirección axial, paralela a las fibras y, por lo tanto, al eje del árbol. Es en esta dirección donde la madera presenta mejores propiedades.
- Dirección radial, perpendicular al axial, corta el eje del árbol en el plano transversal.
- Dirección tangencial, tangente a los anillos de crecimiento y perpendicular al eje del árbol.

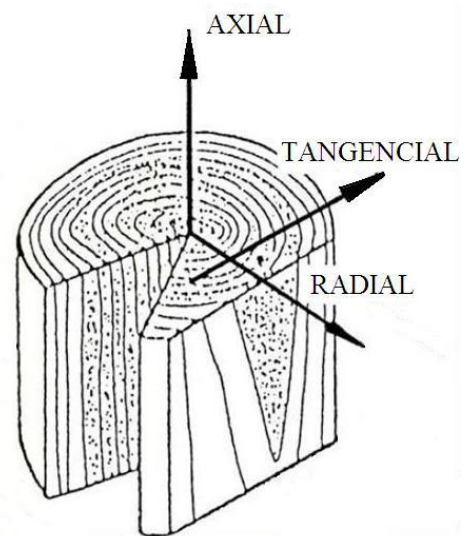


Figura 3.2 Principales direcciones de la madera (Vignote, 2006)

3.3.2 Contenido de humedad de la madera

Los arboles, como seres vivos, están formados en gran medida por agua y, por lo tanto, la madera tiene agua en su interior.



La madera es un material higroscópico, es decir, tiene la capacidad de captar o ceder agua del medio que le rodea. Para ello, la madera contiene huecos en su estructura microscópica, con diferentes tamaños y en función de ello se originan diferentes tipos de fuerzas, con distintas intensidades, capaces de captar y retener agua de la atmósfera que le rodea.

Estos huecos se encuentran en el lumen celular, entre las microfibrillas y entre las fibrillas elementales, siendo los dos primeros susceptibles de ser ocupados por agua, y los últimos son tan pequeños que no pueden albergar agua en su interior.

No obstante, la atmósfera puede tener un poder desecante capaz de captar agua de la madera. De esta manera, dependiendo de la fuerza existente entre un medio y otro, la madera capta o cede agua. Las variables principales que lo determinan son: temperatura, humedad y presión a la que se encuentra.

La capa límite es la zona de la madera que se encuentra en contacto con la atmósfera y juega un papel importante en el secado. Si las piezas de madera se agrupan formando una pila para iniciar el proceso de secado, la velocidad del aire dentro de la pila tiene funciones como transmitir energía provocando un calentamiento del agua contenida en la madera, facilitando así su evaporación y transporte de la humedad que sale de la madera (figura 3.3).

Por lo que durante el secado de la madera se pueden considerar la presencia de dos procesos simultáneos:

- 1) Evaporación de agua en la superficie
- 2) Movimiento de humedad interno

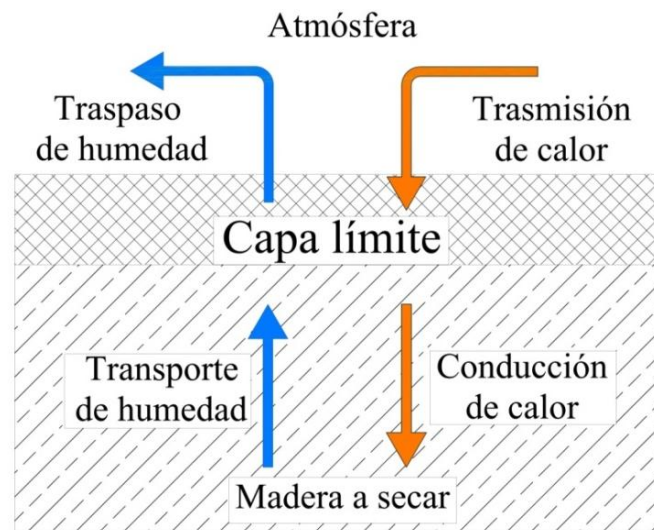


Figura 3.3 Interacciones existentes entre la madera y la atmósfera

El proceso de secado de la madera está influenciado por:

- En la capa límite, velocidad del aire, temperatura y humedad del aire y de la superficie de la madera.
- En la madera, temperatura y contenido de humedad de la madera, aptitud higroscópica, permeabilidad y anatomía de la madera y potencial de transmisión de calor.

La manera en la que el agua se encuentra en la madera es diferente. Cuando el árbol se encuentra recién apeado, la madera presenta un alto contenido de humedad, ya que el agua se encuentra en el lumen de las células y es retenida por unas fuerzas muy pequeñas. En este momento se dice que el agua se encuentra en forma de agua libre, con contenidos de humedad superiores al 30%.

Si la madera continúa secándose, el agua presente en el lumen desaparece, quedando solamente en las paredes celulares como consecuencia de una fuerza de adhesión superficial. Se trata de agua de impregnación.



Finalmente la madera tiene agua de constitución, siendo aquella que entra a formar parte de los compuestos químicos que la constituyen. No se puede eliminar si no es destruyendo al propio material como, por ejemplo, quemándola.

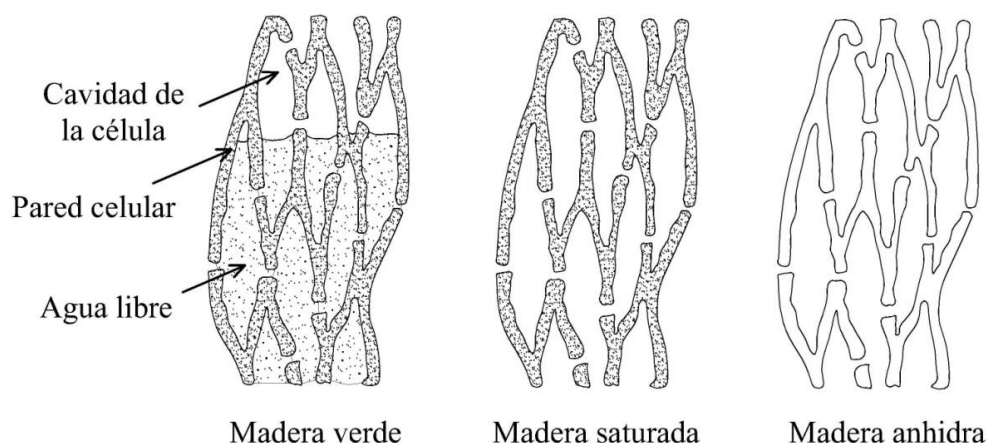


Figura 3.4 Estados de la madera en función de su contenido de humedad

Una consecuencia directa del contenido de humedad es el fenómeno de hinchazón y merma de la madera.

Como se ha comentado anteriormente, la madera tiene la capacidad de captar o ceder agua, provocando en este momento un hinchazón o una merma y, con ello, un aumento o disminución en sus dimensiones respectivamente.

A medida que la madera pierde humedad durante el proceso de secado la madera disminuye sus dimensiones. No obstante, este fenómeno se produce cuando la variación de humedad tiene lugar por debajo del punto de saturación de la fibra.

Como la madera tiene un comportamiento anisótropo, los cambios dimensionales de ésta son de magnitud diferente en sus correspondientes direcciones: tangenciales, radiales y longitudinales, generándose defectos o singularidades en la madera relacionados con el secado.

Se denomina contracción de la madera a la reducción que se produce entre el estado saturado y el estado anhidro de una determinada dimensión.



$$C(\%) = \frac{d_s - d_0}{d_0} \cdot 100$$

donde:

d_s es la dimensión en estado saturado.

d_0 es la dimensión en estado anhidro.

Por ejemplo, para el pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) los coeficientes de contracción son los siguientes (Hermoso, 2001):

- Contracción tangencial 7,7 %
- Contracción radial 4,0 %

El contenido de humedad de la madera tiende a estabilizarse en un determinado valor, denominado contenido de humedad de equilibrio. Dicho valor depende del nivel de humedad relativa y de la temperatura del ambiente (figura 3.5). Por otro lado, también depende del tipo de uso que se da a la madera, época del año o clase de servicio.

Se considera que cuando se alcanza el contenido de humedad en equilibrio la madera se mantiene estable dimensionalmente, evitándose los problemas indicados anteriormente.

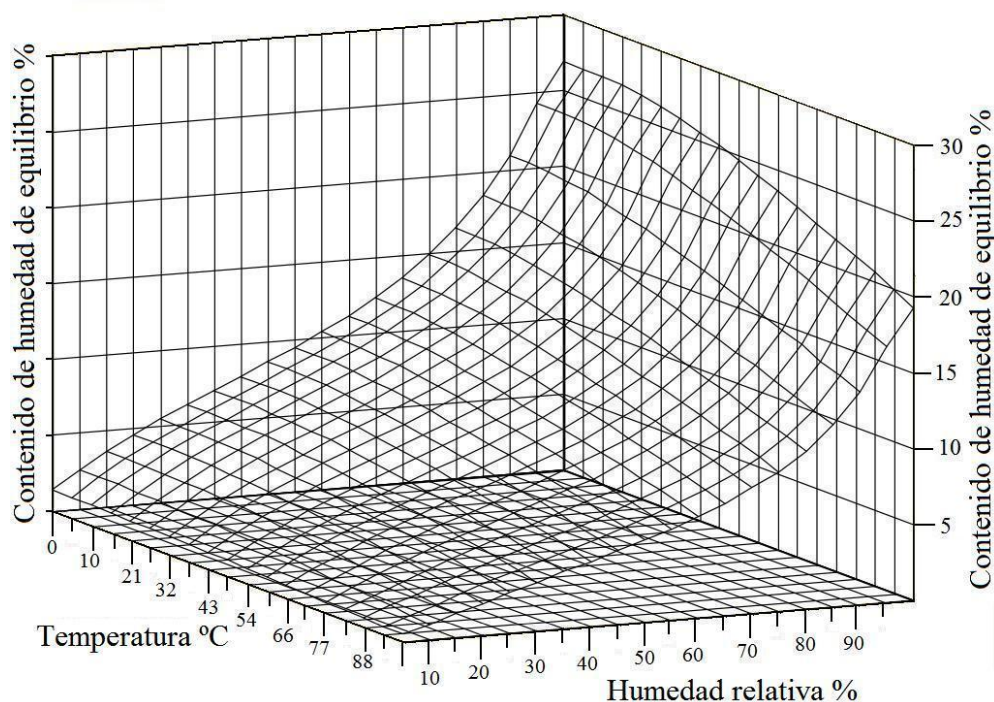


Figura 3.5 Gráfico en tres dimensiones de temperatura, humedad relativa y contenido de humedad de equilibrio

Es importante que la madera, cuando vaya a ser puesta en servicio, se encuentre en el contenido de humedad en equilibrio ya que, en caso contrario, puede afectar a la seguridad de la estructura con la correspondiente aparición de grietas y deterioros, así como holguras y desajustes.

3.4 Propiedades mecánicas relacionadas con el contenido de humedad

La resistencia mecánica de la madera se encuentra estrechamente relacionada con el contenido de humedad presente en ésta y hace que se comporte de forma diferente frente a los esfuerzos, independientemente de la orientación de la fibra con respecto a la carga.

A partir de madera verde, a medida que va perdiendo contenido de humedad, sus propiedades mecánicas van permaneciendo prácticamente constantes, hasta que



desaparece el agua libre presente en la madera (punto de saturación de la fibra, contenido de humedad $\approx 30\%$). Por debajo de este valor, la resistencia mecánica de la madera aumenta progresivamente con el descenso de la humedad.

No obstante, analizando cada uno de los esfuerzos, se tiene:

- Resistencia a la compresión. Es la dificultad que ofrece la madera a ser comprimida o aplastada al aplicarle una carga. Generalmente la resistencia a compresión de la madera aumenta a medida que su contenido de humedad desciende.

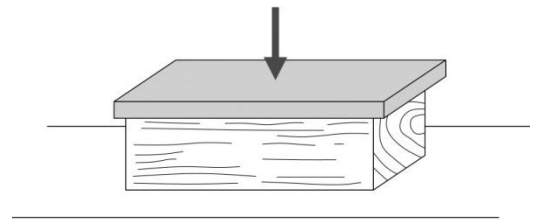


Figura 3.6 Esfuerzo de compresión

- Resistencia a la tracción. Representa la resistencia que ofrece la madera a ser deformada por la actuación de dos fuerzas paralelas y sentido contrario. De la misma manera que en esfuerzos a compresión, su resistencia disminuye al aumentar el contenido de humedad.



Figura 3.7 Esfuerzo de tracción

- Resistencia a la flexión. Se define como la capacidad que tiene la madera a doblarse o curvarse debido a la actuación de una carga, sin que ésta se rompa. De manera contraria a los esfuerzos anteriores, la madera húmeda es más flexible, más resistente a flexión dinámica que las secas.

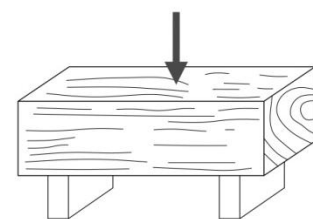


Figura 3.8 Esfuerzo de flexión



- Hendibilidad o escisión. Es la tendencia que tiene la madera a desgarrarse en la dirección paralela a las fibras cuando sufre un esfuerzo, generalmente de tracción paralela a la fibra. La madera con mayor contenido de humedad es más hendible que la seca.

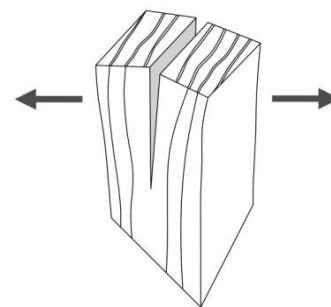


Figura 3.9 Hendibilidad

3.5 Defectos o singularidades relacionadas con la humedad

Como se ha visto en el apartado anterior, la variación del contenido de humedad de la madera tiene grandes implicaciones, no solo en cuanto a su resistencia mecánica, sino también en otras propiedades importantes como su resistencia mecánica, el peso y la densidad, su resistencia al ataque de hongos cromógenos e insectos xilófagos, en sus cambios dimensionales que sufre como consecuencia de esa variación. Su mayor o menor aptitud para recibir adhesivos y acabados.

Los problemas de manchado se dan cuando la madera presenta contenidos de humedad altos, como consecuencia del ataque de hongos cromógenos. La madera desarrolla generalmente tonalidades grisáceas o azuladas. No afectan a la estructura de la madera, pero si disminuyen su valor estético.

La madera, en su proceso de secado, sufre una serie de deformaciones. De esta manera, si se utiliza y se pone en servicio madera con un elevado contenido de humedad, esta se irá secando y surgirán contracciones. Al ser la madera un material heterogéneo y anisótropo, estas contracciones tienen de diferente magnitud en cada dirección respecto a sus fibras, y provoca la deformación de los elementos maderables de la estructura.

Las fendas de secado y grietas consisten en una separación de las fibras de la madera debido a esfuerzos de tensión originados por las fuertes contracciones que se producen al disminuir el contenido de humedad. Pueden favorecer el ataque de insectos xilófagos.



Cuando una pieza de madera se encuentra en proceso de secado, el agua almacenada en la superficie y a una profundidad pequeña por debajo de dicha superficie es liberada al ambiente circundante. Esta pérdida de agua superficial esta siendo reemplazada por agua que se mueve desde el interior hasta la superficie de la madera.

No obstante, al final dicha superficie va quedando con menos humedad que el interior de la madera, formándose una distribución de agua desde el interior más húmedo hacia la superficie más seca, lo que se conoce como gradiente de humedad. Hasta que no se llega a un contenido de humedad por debajo del punto de saturación de la fibra, la madera se encuentra libre de contracción.

La madera es un material que actúa como un cuerpo bien cohesionado pero la superficie que se va secando puede presentar una fuerte tendencia a contraerse. Cuando la parte seca tiende a contraerse genera esfuerzos internos de compresión sobre la parte que no se ha contraído. Es decir, la superficie de madera tiende a contraerse pero ésta es impedida por la resistencia que opone la zona interior húmeda de la madera, que no se contrae.

En la figura 3.10 se muestra la evolución de los esfuerzos que sufre una pieza a medida que se va secando, cuya intensidad viene reflejada por la longitud de las líneas o segmentos.

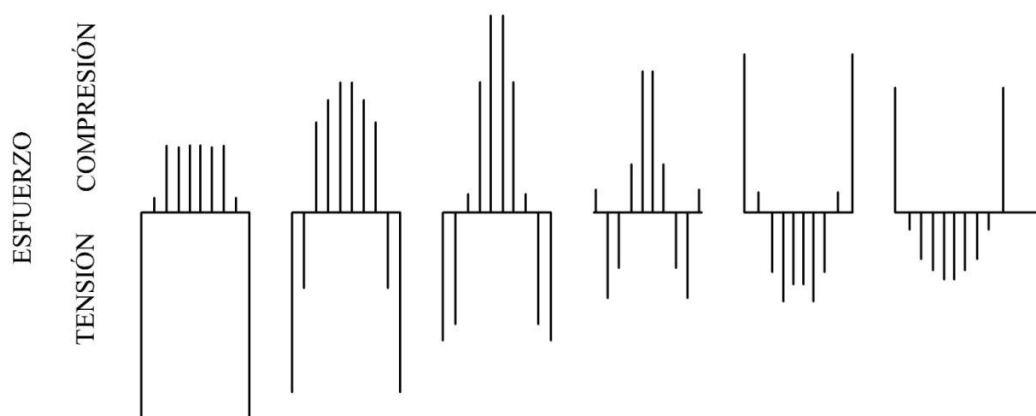


Figura 3.10 Esfuerzos de secado (Joly, P.; More-Chevalier, F. 1980)



Por ello, la madera queda sujeta a esfuerzos de compresión en el interior y compensada con esfuerzos de tensión en la superficie.

- Si los esfuerzos de tensión en la superficie de la madera son de mayor magnitud que la resistencia en tensión perpendicular a la fibra se pueden producir las grietas superficiales.
- Si los esfuerzos de compresión en el interior de la madera superan la resistencia permisible por la madera en dirección perpendicular a las fibras se puede contribuir al colapso de la madera.

3.6 Medida del contenido de humedad

El contenido de humedad de la madera se puede determinar por medio de una serie de procedimientos basados en principios diferentes.

3.6.1 Método gravimétrico

El método gravimétrico se basa en la diferencia de peso que tiene la madera en estado húmedo y en estado seco.

$$H(\%) = \frac{P_h - P_0}{P_0}$$

donde

P_h es el peso húmedo de la madera.

P_0 es el peso seco o anhidro de la madera

No obstante se precisa de estufa, ya que el peso seco se obtiene pesando la madera en estado anhidro, tras someterla a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ durante 24 horas, para conseguir un peso



seco constante. El procedimiento a seguir está marcado por la norma UNE-EN 13183-1.

El método de medida, teóricamente, es muy preciso pero, en la práctica, se trata de una aplicación limitada porque tiene el inconveniente de tener carácter destructivo del material, razón por la que no se puede utilizar para madera estructural que se encuentra en servicio.

3.6.2 Métodos eléctricos

– Resistencia eléctrica

La madera es un buen aislante eléctrico, sin embargo, existen variaciones en su conductividad eléctrica. Estas variaciones de resistencia eléctrica pueden estar relacionadas con la orientación de la fibra, con la temperatura y con el contenido de humedad.

Por ello, un procedimiento muy empleado para la medida del contenido humedad se basa en la resistencia eléctrica que presenta la madera. Se sigue la norma UNE-EN 13183-2.

Teóricamente, la presencia de mayor cantidad de agua en la madera implica una menor resistencia y, a su vez, una mayor intensidad de corriente circulando dentro de la madera. De hecho, la madera en ausencia de humedad tiene las propiedades de un excelente aislante.

La temperatura a la que se encuentre la madera también influye en la medición eléctrica de la humedad de la madera. La resistencia eléctrica disminuye al aumentar la temperatura, para contenidos de humedad constante.

Con respecto a la orientación de la fibra también existen variaciones. La conductividad de la madera en dirección longitudinal es aproximadamente el doble que en las direcciones radial o tangencial.



El instrumento mas utilizado es el xilohigrómetro que consiste en la introducción en la madera de un par de electrodos, entre los que se mide la resistencia eléctrica. No se produce destrucción del material, por lo que se puede realizar tantas veces como se quiera sobre una misma pieza. No obstante, si se hacen abundantes mediciones en una misma pieza o en una zona de una estructura muy visible puede que no sea lo más adecuado, debido a la gran cantidad de perforaciones que genera (figura 3.11).

Por otro lado, se obtiene rápidamente los resultados y puede realizarse mediciones en puntos críticos. Por otro lado, permite medir humedad a diferentes profundidades del material, por lo que se puede determinar, a pie de obra, el gradiente de humedad existente entre la superficie del material y diferentes profundidades.

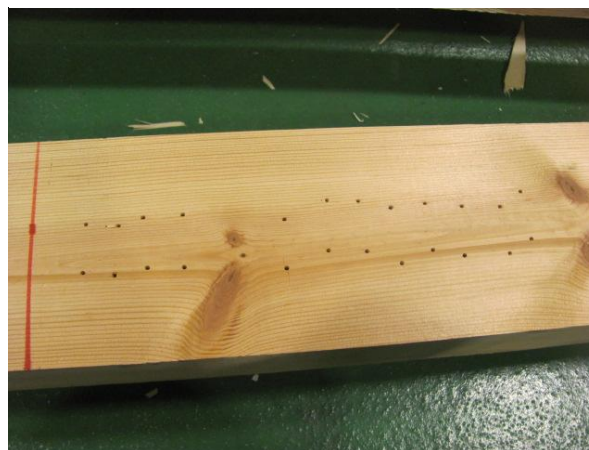


Figura 3.11 Perforaciones realizadas con xilohigrómetro de resistencia eléctrica

A.J. Stamm y E. Nusser establecen unas relaciones entre la conductividad y el contenido de humedad de la madera.

$$\log \sigma = \log \frac{1}{\rho} = a \cdot h - c$$

$$\rho = d \cdot e^{b \cdot h}$$

donde,



σ es la conductividad

ρ es la resistividad

h es la humedad

a , c , b y d son constantes

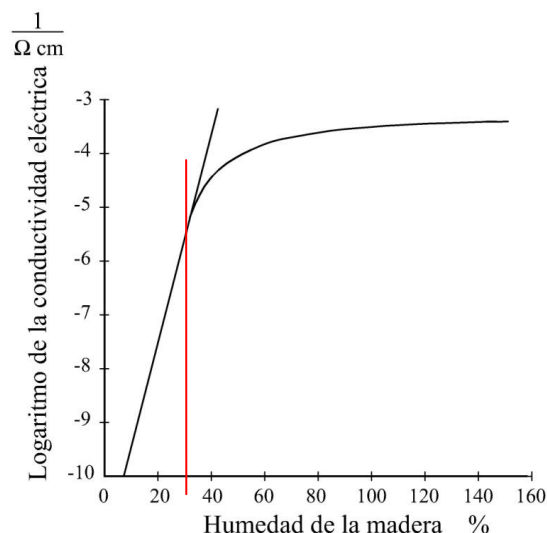


Figura 3.12 Conductividad eléctrica en función de la humedad de la madera (Stamm, A. J.)

Estas expresiones son validas para humedades comprendidas entre 0 % y 30 % en donde el logaritmo de la resistencia y el contenido de humedad se encuentran en relación lineal (figura 3.12).

Como se ha comentado anteriormente la conductividad varía en función de la dirección de la fibra de la madera que se considere. Por ello es importante conocer en que dirección hay que utilizar el xilohigrómetro, mediante la norma correspondiente o las instrucciones del fabricante.

– Constante dieléctrica (capacipativo)

Este método se basa en otro parámetro de la madera que es la constante dieléctrica. La constante dieléctrica de la madera describe su habilidad para absorber y almacenar energía. Depende en gran medida de la densidad de la madera, por ello es muy importante conocerla, así como la especie con la que se esta trabajando, por lo que midiendo su constante dieléctrica se determina su contenido de humedad.



Este método se utiliza en instrumentos de contacto, que solo se apoyan en la superficie de madera. Compara la constante dieléctrica de madera totalmente seca, que suele ser baja, frente a la constante eléctrica de la madera húmeda, que es mucho más alta. (Norma UNE-EN 13183-3).

La precisión alcanzada es algo menor que en el caso de los medidores de resistencia eléctrica. No obstante, los electrodos tienen forma de superficie plana y no dañan a la madera, por lo que son útiles para la determinación del contenido de humedad en madera muy visible que no sea conveniente que reciba algún tipo de daño debido al agujereo.

Una limitación de xilohigrómetros que se basan en este método es la profundidad de medición, que depende de la densidad del material. Por ejemplo, en el caso de materiales muy ligeros la profundidad de medición puede llegar entre 10 y 12 cm.

La constante dieléctrica es dependiente de la proporcionalidad entre huecos ocupados por aire y huecos ocupados por agua presentes en la estructura microscópica de la madera. En el caso del aire dicha constante dieléctrica es 1 mientras que en el agua es del orden de 80.

Por ello en madera seca, con sus huecos ocupados por aire, la constante será próxima al valor del aire, en torno a 4,5. Mientras que en madera húmeda, con huecos ocupados por agua, la constante dieléctrica será mayor (figura 3.13).

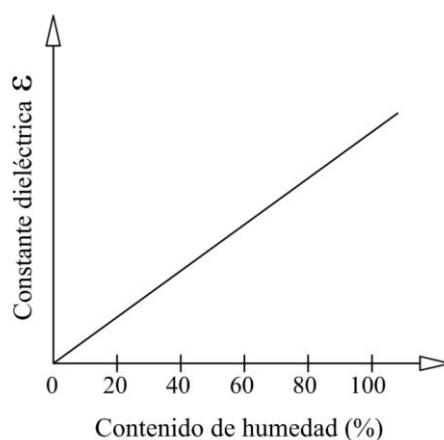


Figura 3.13 Variación de la constante dieléctrica en función del contenido de humedad

Como referencia los valores aproximados de la constante dieléctrica en el caso de madera húmeda oscilan entre 10 y 30, mientras que en madera seca son de entre 2 y 7.

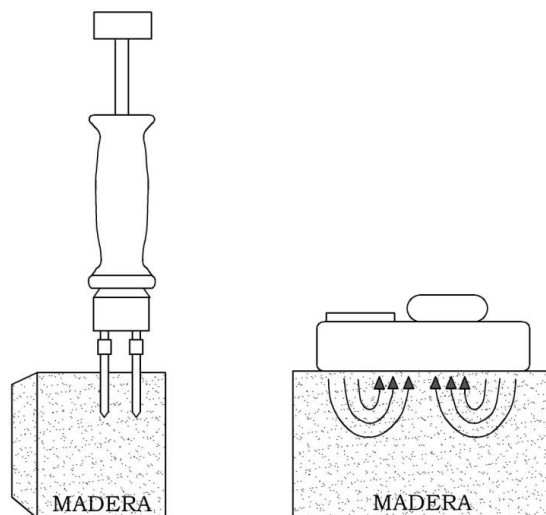


Figura 3.14 Xilohigrómetro de resistencia eléctrica (derecha) y xilohigrómetro capacitivo (izquierda)

Existen otros diversos métodos para medir humedad en la madera tales como radiación infrarroja, microondas o por destilación, pero ninguno de ellos es de importancia práctica para la industria maderera.

3.7 Técnicas no destructivas

La madera es un material heterogéneo, que se genera a partir del crecimiento de plantas leñosas. Estas plantas viven dentro de ecosistema formado por una gran cantidad de elementos o variables, por lo que se producen una gran cantidad de interacciones bióticas o abióticas entre dichos elementos que, en definitiva, condicionan el mayor o menor crecimiento de la madera, la presencia de singularidades o defectos, daños de cualquier tipo, etc., y originándose un material irregular.



Las técnicas o ensayos no destructivos NDT (Non Destructive Testing) permiten realizar una evaluación de un material determinado sin alteración de forma permanente de sus propiedades físicas, químicas y mecánicas. Estas técnicas son usadas para determinar la calidad, las propiedades y el rendimiento del material a estudiar. Principalmente se utilizan para determinar la existencia de grietas, vacíos o discontinuidades en el material, sobre todo si no son fácilmente apreciables.

Estas técnicas para el caso de la madera son muy diferentes con respecto a materiales homogéneos tales como metales, vidrio, plásticos, etc. Estos materiales presentan unas propiedades mecánicas muy estudiadas por el hombre, siendo conocidas y controladas.

Jayne, en 1959, propuso la hipótesis fundamental de las NDT sobre madera. En ella se afirmaba que la madera así como otros productos derivados se caracterizan por la posibilidad de almacenar y disipar energía. Por ejemplo, la propiedad que presenta la madera de almacenar energía se manifestaba por la velocidad a la cual una onda mecánica viaja a través de ella.

La capacidad de la madera para atenuar una onda de vibración indica su capacidad para disipar energía. Jayne propuso la hipótesis de que estas propiedades que posee la madera para almacenar y disipar energía se podían conocer o determinar a partir de los mismos métodos que se utilizan para determinar su comportamiento mecánico en condiciones estáticas. Por ello, es posible relacionar estas propiedades utilizando métodos de análisis numéricos. (Ross, R. J.; Pellerin, R. F. 1994)

Sin embargo, a pesar ser técnicas muy utilizadas tienen una serie de limitaciones:

- Hay casos en los que se requiere una inversión inicial relativamente alta, aunque muchas veces se puede justificar si se analiza correctamente la relación coste-beneficio.
- La propiedad física estudiada, muchas veces, es medida de forma indirecta y es evaluada cualitativamente o por comparación.



- Se requiere personal capacitado y cualificado a pesar de que las pruebas son fáciles de llevar a cabo. Por otro lado es necesario interpretar y evaluar correctamente la información.
- Una misma indicación puede ser interpretada y ponderada de forma diferente por dos o más inspectores en el caso en el que no existan procedimientos de inspección preparados y cualificados debidamente.

Las técnicas no destructivas más utilizadas en la evaluación de la madera son la clasificación visual, la propagación de ondas a través del material: ondas sonoras, ondas de impacto de frecuencia sónica y ultrasónica, así como análisis de la frecuencia de vibración de la madera.

3.7.1 Inspección visual

Es la técnica más sencilla de todas y debe ser el primer paso en la evaluación de cualquier estructura de madera, ya que sus resultados se pueden emplear para guiar las demás técnicas no destructivas.

Mediante la inspección visual, se puede realizar una rápida evaluación cualitativa de la integridad de una estructura. Las deficiencias más evidentes pueden ser fácilmente identificadas, como daños externos, presencia de fraccionamientos, fluencias o deterioro.

La inspección visual es muy útil y no requiere el empleo de equipos costosos pero tiene claras limitaciones.

Se trata de una técnica subjetiva, que depende de la formación, agudeza visual y experiencia del personal. Los resultados son cualitativos y no cuantitativos, y el conocimiento se limita a la superficie exterior de la madera. Patologías internas como pudriciones, ataques de hongos o insectos xilófagos puede que sean prácticamente indetectables.



3.7.2 Métodos acústicos

La investigación con ondas sonoras se esta utilizando cada vez con más frecuencia para realizar ensayos no destructivos en la madera.

Los métodos acústicos se basan en la propagación de una onda sonora, de frecuencia determinada, a través de la madera. Fundamentalmente el parámetro que permiten determinar es el tiempo que tarda la onda en recorrer el material a ensayar.

Los equipos basados en esta técnica cuentan, generalmente, con dos palpadores o transductores que se colocan a la distancia conocida y entre los cuales la onda va a recorrer el material. De tal manera que, mediante la ecuación del movimiento rectilíneo y uniforme, se obtiene la velocidad a la que se propaga dicha onda.

$$v = \frac{L}{t}$$

donde

L es la longitud recorrida por la onda

t el tiempo que tarda la onda en recorrer el material, proporcionado por el equipo

El empleo de estas ondas ayuda a la detección de vacíos interiores, pudriciones así como el deterioro de elementos estructurales no apreciables a simple vista, y permite la determinación de las propiedades mecánicas de la madera.

La onda sonora se propaga por un medio solido, como la madera, a una velocidad determinada. Sin embargo, si la onda se encuentra con una singularidad o defecto interior, la velocidad de propagación será menor ya que el aire es un medio de propagación más lento. Además, generalmente, al pasar la onda de sonido desde el aire a cuerpos sólidos se produce un debilitamiento de la onda.



– Ondas de impactos

Las ondas de impacto o de tensión se originan a partir del impacto en un palpador colocado en la superficie del material a estudiar, originándose una onda que recorre el material y que llega a un receptor, situado en otra parte del mismo material o pieza. Se produce, entonces, una transmisión de energía en la excitación mecánica mediante el golpeo de martillo.

Estas ondas tienen una frecuencia entre 20 Hz y 20 kHz, por lo que se propagan a través del material a la velocidad del sonido.

Como ya se ha comentado, conocida la longitud del material a recorrer, se determina el tiempo que tarda la onda en atravesar el material y se puede obtener la velocidad de propagación de la onda.

El comportamiento de la onda en la madera sana y en la madera podrida es diferente, ya que en esta última la onda viaja de forma más lenta, siendo este hecho el que permite detectar el defecto.

Por otro lado, una onda de tensión, se atenúa más rápidamente en la madera podrida que en la madera sana. Se ha observado que el sonido transmitido en la madera sana tiene componentes de mayor frecuencia, mientras que en la madera deteriorada solo se transmiten los de baja frecuencia.

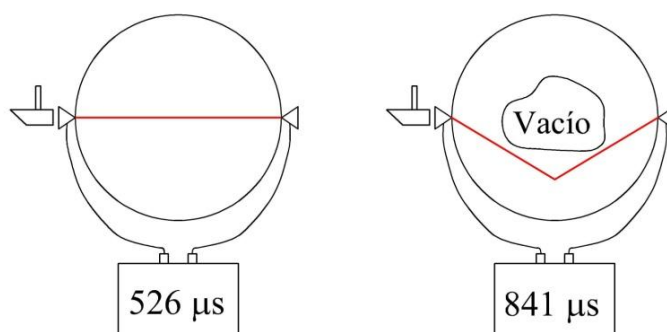


Figura 3.15 Trayectoria seguida por la onda en madera sana y en madera con vacío o pudrición (FAKOPP)



Por otro lado, un uso común de las ondas de tensión es la determinación del módulo de elasticidad (MOE) en elementos estructurales. El conocimiento de la velocidad de propagación de la onda y de las propiedades elásticas de la madera permite conocer el módulo de elasticidad.

$$MOE_d = \rho \cdot v^2$$

donde

ρ es la densidad, en kg/ m³

v es la velocidad de propagación de la onda, en m/s.

– Ondas ultrasónicas

En 1942, F. Firestone fue la primera persona en aplicar las ondas de ultrasonido mediante el principio del sonar, para la localización de buques y medir profundidades marinas. También lo aplicó para la detección de heterogeneidades en los materiales mediante una señal reflejada. A partir de 1945, favorecida por la urgente demanda de ensayos no destructivos, el ensayo por ultrasonido tuvo una aceptación general.

En la actualidad, los equipos que utilizan frecuencias ultrasónicas constan de un par de transductores que utilizan un material piezoeléctrico, generalmente un cristal de cuarzo, lo que convierte una corriente eléctrica en energía mecánica (ondas oscilatorias). Durante el ensayo el transductor se suministra con una corriente eléctrica, que se convierte en una señal de onda y dirige las ondas en el material a ensayar.

Se utiliza habitualmente en la evaluación de piezas de madera en donde los transductores se colocan muy a menudo en los extremos de las piezas de tal manera que la onda se propaga en la dirección de la fibra.



Es importante realizar un buen acople del transductor a la superficie del material para que el contacto sea completo entre ambos, ya que el aire transmite las ondas sonoras de forma muy deficiente. Esta configuración de los transductores hace que en el caso de la evaluación in-situ tenga ciertas limitaciones, sobre todo relacionado con el acceso a piezas de madera de la estructura.

Las ondas ultrasónicas son ondas acústicas de idéntica naturaleza (mecánica o elástica) que las ondas sónicas, caracterizándose en que operan a frecuencias por encima de la zona audible del espectro acústico, esto es frecuencias por encima de los 20.000 Hz, a diferencia de las anteriores, que tenían frecuencias dentro del rango audible.

Las características de las ondas ultrasónicas son las siguientes:

- Viajan largas distancias en materiales sólidos
- Viajan en haces de sonido bien definidos
- Su velocidad es constante en materiales homogéneos
- Las ondas de vibración son reflejadas en interfases donde las propiedades físicas y elásticas cambian.
- Las ondas pueden cambiar su modo de vibración o estar sometidas a la conversión del modo en interfases del material.

Las ondas de frecuencia ultrasónica tienen mayor frecuencia que las de frecuencia sónica, menor longitud de onda y, por lo tanto, mayor poder resolutivo. Por ello, frecuencias pequeñas permite barrer mayores distancias, pero con menor resolución.

Atenuación de la onda ultrasónica (figura 3.16). Se conoce como atenuación a la pérdida de la energía de la señal ultrasónica que se produce de forma progresiva. De esta manera, la onda va perdiendo energía a medida que viaja dentro del material, como consecuencia de la resistencia que opone la estructura del material.



Estas ondas se propagan en un medio homogéneo a una velocidad y atenuación que son características para cada material por lo que, de esta manera, las dos propiedades pueden ser empleadas para determinar la existencia de defectos en su interior.

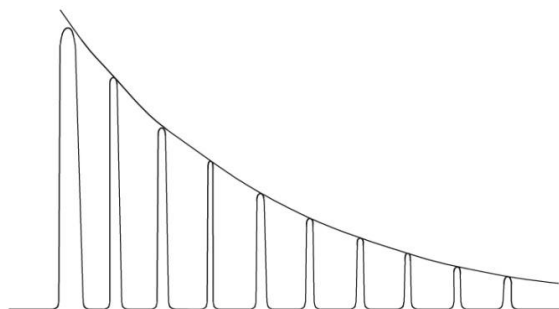


Figura 3.16 Atenuación de la señal ultrasónica

– Tomografía acústica

Otro instrumento basado en métodos acústicos es la tomografía acústica. Esta técnica se utiliza para determinar la situación interna de un árbol, para ello se ayuda de ondas sonoras.

Dependiendo del equipo utilizado, se utilizará una metodología u otra. Por lo general, una serie de clavos se colocan alrededor del árbol formando un plano o una sección. Estos clavos son puntos de medición que se utilizan para emitir y recibir ondas, de naturaleza sonora y se generan de forma mecánica, mediante golpeo de martillo.

El equipo, dotado de un software, mide el tiempo que tarda la onda entre el punto emisor y los receptores. El software calcula la velocidad sónica aparente y dibuja un mapa de velocidades o de densidades, resultante de los datos sonoros registrados (figura 3.17).

Como se ha comentado en otros equipos que usan métodos acústicos, la velocidad del sonido esta muy relacionada con la densidad de la madera y, por lo tanto, con la solidez de ésta.

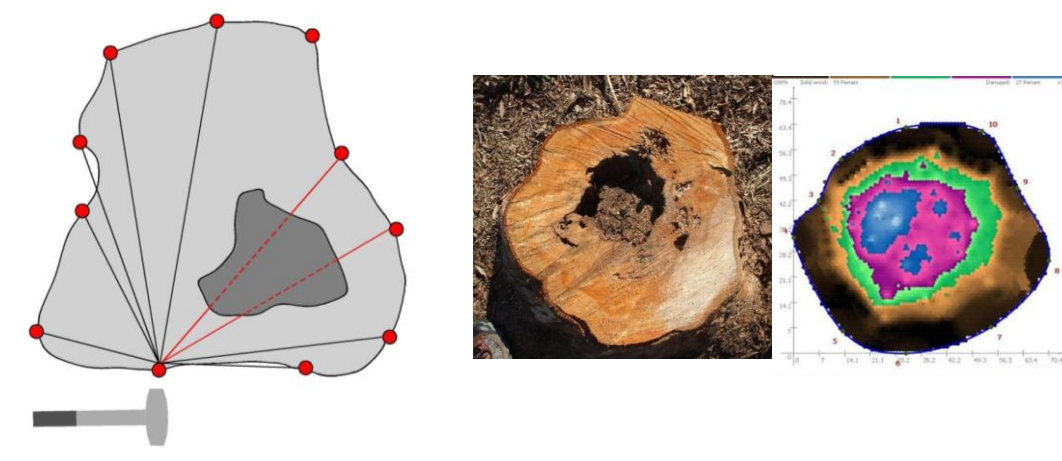


Figura 3.17 Principio de funcionamiento de la tomografía acústica

Uno de los instrumentos más utilizados que utiliza esta tecnología es el tomógrafo PiCUS Sonic.

3.7.3 Análisis de vibración

Las técnicas de vibración se utilizan para determinar la condición física de un material o estructura. La teoría general se basa en que todos los materiales tienen una frecuencia natural de vibración. Cualquier desviación significativa de esta frecuencia teórica es una indicación de los posibles daños en el material.

En 1986, N. Sobue introdujo un método de cálculo del módulo de elasticidad dinámico con la transformación rápida de Fourier del espectro en la muestra vibrante. El parámetro que se midió fue la frecuencia natural de la pieza encontrándose coeficientes de correlación altos con respecto al tamaño estructural de las muestras (Sobue, 1986).

Normalmente, el análisis de vibración se comienza poniendo el material en vibración mediante un golpe, analizando la frecuencia natural asociada a dicha vibración que se encuentra relacionada con sus propiedades físicas y mecánicas, como la densidad y el módulo de elasticidad respectivamente.



En función del lugar de la pieza en donde se efectúe el golpe se obtendrá una vibración longitudinal, una vibración en flexión o una vibración en torsión

En el caso de que el golpeo se realice en la testa de la pieza, se podrá analizar la vibración longitudinal originada y, con ello, determinar propiedades mecánicas de la pieza:

$$v = \lambda \cdot f \rightarrow v = 2 \cdot L \cdot f$$

$$MOE_d = \rho \cdot v^2 \rightarrow MOE_d = \rho \cdot (2 \cdot L \cdot f)^2$$

donde:

MOE_d , es el módulo de elasticidad dinámico, en N/m^2

L es la longitud total de la probeta, en m

f es la frecuencia natural de vibración longitudinal, en Hz

ρ es la densidad del material, en kg/m^3

Si la pieza es golpeada en otra zona o dirección como de manera perpendicular al eje de la pieza, la vibración será de flexión. No obstante las ecuaciones para determinar las propiedades mecánicas son más complejas.

3.7.4 Métodos electromagnéticos

– Propiedades térmicas

La termografía infrarroja (TIR) es una técnica que se basa en la transferencia de calor existente entre el material y el ambiente que lo rodea. Se obtiene la temperatura de la superficie de un material mediante la captación de la radiación infrarroja que emite. El mapa térmico de la superficie se conoce como termograma.

La madera es un material que presenta una serie propiedades térmicas, que son las que van a ser utilizadas en la inspección termográfica. Estas propiedades son



principalmente el calor específico, la conductividad y la difusividad térmica. Cuando el flujo de calor en la madera es alterado por la presencia de singularidades o defectos se generan contrastes de temperatura en su superficie.

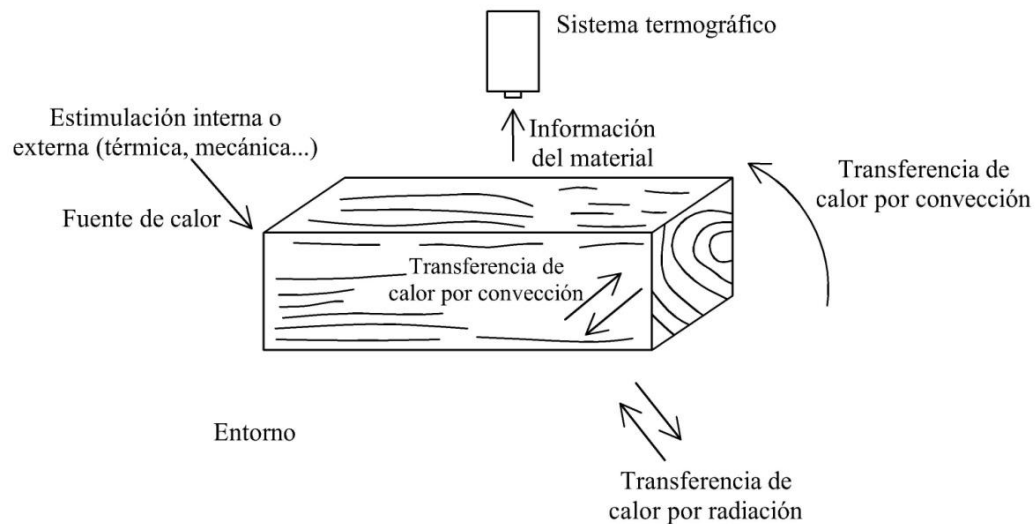


Figura 3.18 Esquema del funcionamiento de los métodos electromagnéticos

Existen dos tipos de técnicas: la termografía activa y la termografía pasiva.

En la termografía activa se usa una estimulación externa para provocar un flujo de calor interno en el material, por lo que la existencia de un defecto interno afectaría al flujo calorífico.

El calor específico (c) de los materiales se define por la siguiente ecuación:

$$c = \frac{Q}{m \cdot (\tau_2 - \tau_1)}$$

donde

Q es la energía, generalmente térmica, necesaria para pasar de la temperatura τ_1 a τ_2 .

m es la masa del material.

La termografía pasiva se refiere a aquellos casos en los que no se usa ninguna estimulación de calentamiento o enfriamiento externo para provocar un flujo de calor.

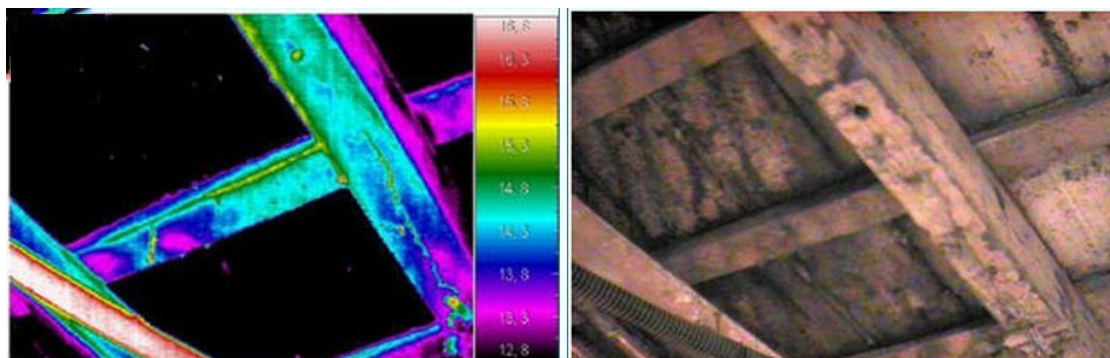


Figura 3.19 Inspección termográfica de un techo de madera con infiltraciones de agua

Los defectos, así como el contenido de humedad son parámetros que alteran las propiedades térmicas de la madera. Por ello, la diferencia de humedad entre dos zonas implica una diferencia térmica entre ambas. El agua presente en la madera causa un incremento en su densidad y con ello, en el calor específico y la conductividad térmica.

La diferencia térmica entre las distintas zonas se acentúa cuando el contenido de humedad no es uniforme. En muchas estructuras exteriores, con presencia de madera sana y madera deteriorada, existe una diferencia de contenido de humedad entre ambas. En el caso de la madera deteriorada la presencia de humedad es mayor debido a que su estructura interna es menos densa y, por ello, las propiedades térmicas de la madera sana y la madera deteriorada son diferentes.

Al basarse en las propiedades térmicas es posible detectar diferentes tipos de madera utilizados en una estructura debido a las diferentes densidades que presentan.

No obstante, su principal desventaja es que es efectivo únicamente en la detección de defectos poco profundos.

También resulta complicado, en el caso de la termografía activa, producir un calentamiento uniforme originando variaciones de emisiones en diferentes zonas del material.



Al igual que con respecto a los defectos y al contenido de humedad, la conductividad térmica de la madera también varía en función de la dirección del flujo de calor con respecto a la dirección de la fibra.

En madera seca, la conducción de calor en dirección a la fibra es de 2,5 veces más rápido que en la dirección transversal. Esta relación en madera húmeda es de sólo 1,5, debido a que el agua iguala la diferencia.

– Microondas/georradar

Se trata de una técnica electromagnética basada en la emisión de ondas a frecuencias que van desde 3 GHz a 300 GHz a través de los materiales y posterior detección de estas ondas. Las heterogeneidades del material originan en las diferencias en las ondas recibidas.

Para la transmisión y recepción de la onda se pueden utilizar dos sondas o bien una sola sonda (figura 3.20).

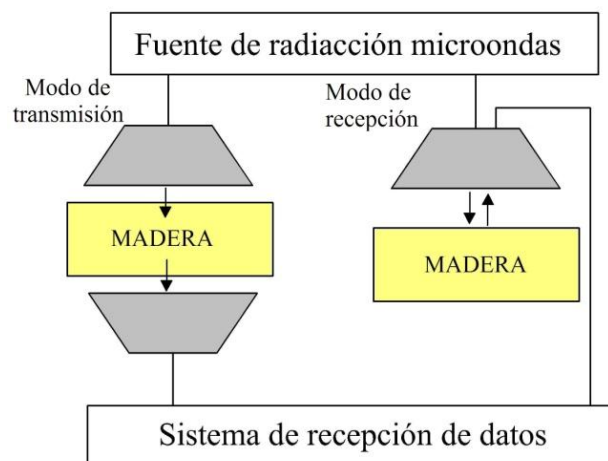


Figura 3.20 Esquema del sistema de funcionamiento de la radiación microondas

Cada material posee unas características electromagnéticas diferentes, provocando reflexiones diferentes en función del medio en el que se propagan, pudiendo averiguar los puntos de interfase gracias a la diferencia de la onda recibida. Los impulsos emitidos se reflejan en las interfases de materiales con propiedades dieléctricas diferentes, como pudieran ser nudos, pudriciones u otros defectos.

Dado que las ondas electromagnéticas son sensibles a la presencia de humedad, esta técnica tiene un importante potencial para la detección de focos de pudrición en estructuras de madera.

Los datos obtenidos se leen a través de radargramas, en los cuales se pueden ver discontinuidades en el material.

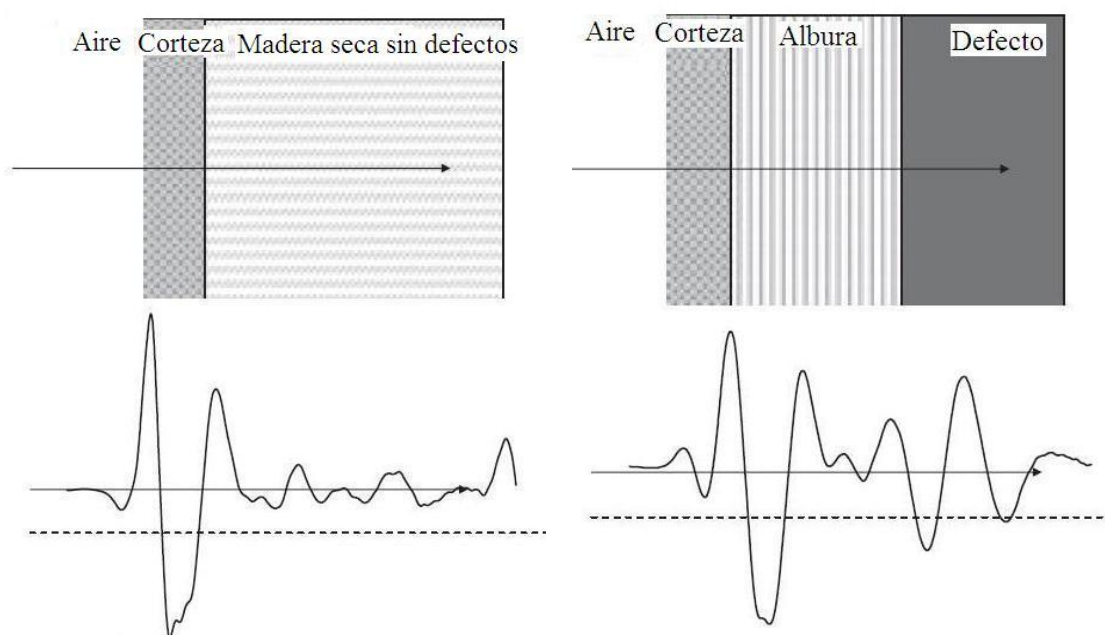


Figura 3.21 Comparación de dos radargramas de madera sana y madera con defectos (Butnor et al, 2009)

– Tomografía computarizada

Es una técnica muy utilizada en el campo de la medicina, que permite reconstruir la sección transversal de un objeto mediante el empleo de rayos X. Se puede utilizar para detección de pudriciones, estudios dendrocronológicos, cubicación precisa de arboles, etc. No obstante no ha sido muy utilizado en el ámbito forestal debido a su elevado coste.



Dicha técnica se basa en proporcionar movimiento circular a un generador de rayos X y a una placa fotográfica, mientras que el árbol permanece entre ambas. De esta manera la sombra de un determinado plano del árbol, se halla situada siempre en la misma posición de la placa, pero las sombras del resto del árbol están en continuo movimiento, con lo cual son borradas por completo.

En este tipo de scanner los colores blancos corresponden a densidad 1 y el negro para densidad 0. De tal manera que un punto es más denso cuanto más blanco sea.

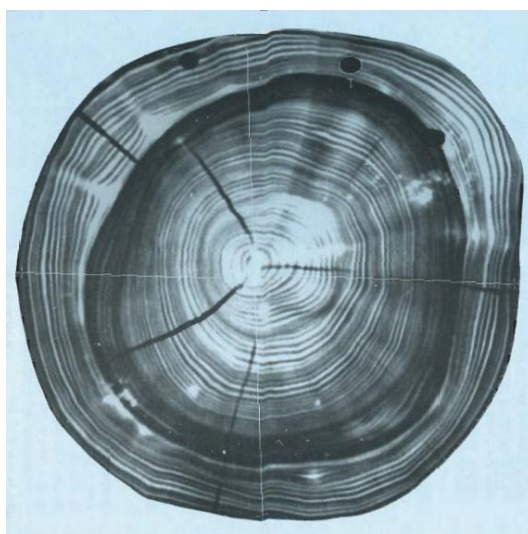


Figura 3.22 Sección transversal de una troza de madera vista mediante tomografía computarizada

En la figura 3.22 se observa con relativa nitidez los anillos de crecimiento del árbol como consecuencia de la diferente radiación absorbida por las células pertenecientes a la madera de primavera y a la de verano.

– Radiografía

La radiografía es una técnica que utiliza una radiación penetrante generada a partir de varias fuentes, normalmente electrones, neutrones, rayos gamma y rayos X. Dicha fuente emite un haz de radiación dirigida hacia el material de estudio. El material examinado tiene diferentes niveles de absorción de la radiación en función de la densidad del material.

La técnica consiste en colocar en frente de la fuente de radiación y detrás del material a ensayar detrás del objeto de interés una especie de soporte de grabación sensible a la radiación generándose imágenes (figura 3.23).

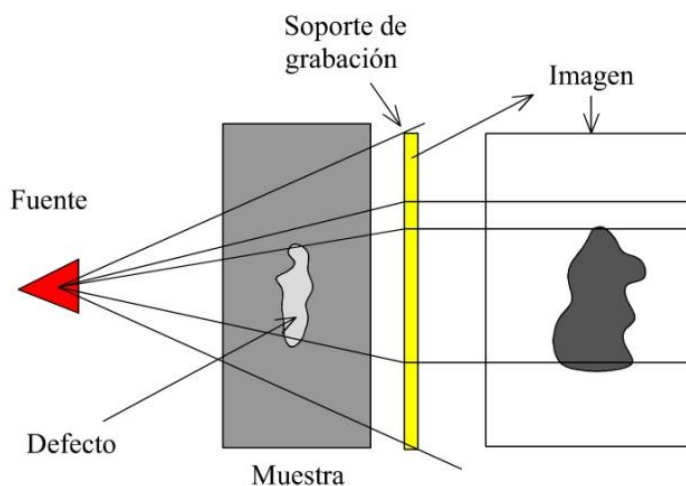


Figura 3.23 Radiografía

Se trata de un método no destructivo que permite la investigación de aspectos tales como la estructura del material, los defectos internos y el estado de conservación que, a veces, no se puede obtener por otros medios.

Al utilizar rayos X y rayos gamma que pasan a través del material, se produce una atenuación de la radiación en función de la composición del material, y esto incluye la densidad y espesor. Esta atenuación o pérdida de intensidad es en lo que se basa la inspección radiográfica.

Las etapas presentes en el deterioro de la madera se pueden identificar mediante la observación de la radiografía.

- La madera sana presenta una estructura de madera claramente definida, con su textura correspondiente y sus anillos de crecimiento anual. Por otro lado la densidad óptica es uniforme.



- La madera es estado de descomposición parcial muestra la pérdida de la estructura de madera, los anillos aparecen pero de manera algo difusa, y la densidad óptica varía según el grado de descomposición.
- Las áreas deterioradas que han perdido la estructura de madera aparecen sólo como una masa amorfa.

La detección de defectos internos mediante radiología esta limitada por el tamaño y orientación de los defectos. Para la localización de grietas internas es necesario que la grieta se de un tamaño adecuado, por lo menos de un 2 % del espesor de las piezas, y estar orientadas de manera paralela al haz de radiación.

3.7.5 Métodos mecánicos

– Fijos

Clasificadoras automáticas de madera

Según la norma europea EN 338 se establece la asignación de clases de clases resistentes en la madera y, con ello, su calidad mecánica de acuerdo a tres variables: modulo de rotura a flexión (MOR), su módulo de elasticidad (MOE) y densidad.

Las clasificadoras automáticas de madera constituyen un método fiable y eficaz de clasificación de la madera aserrada a través de su resistencia (Fernández-Golfín, J. I., 2001).

La clasificación no destructiva de la madera por métodos automáticos tiene sus orígenes en torno al año 1885 con los trabajos de Bauschinger y Unwin que informaron acerca de las relaciones existentes entre la rigidez de la madera y su resistencia.

A partir de estas relaciones es cuando se comienza a desarrollar la tecnología necesaria para poner en marcha los clasificadores automáticos de madera basándose en la relación entre rigidez y resistencia a flexión. De esta manera se determina el



módulo de elasticidad a través de técnicas no destructivas y, con ello, la resistencia de la pieza de una manera relativamente exacta.

La medida de la deformación para una fuerza constante o la medida de la fuerza necesaria para una deformación constante es la variable indicadora que se obtiene en el ensayo, que predice la elasticidad del material y, a partir de ahí, su resistencia a la rotura.

Además, estas nuevas máquinas permiten conocer un número elevado de propiedades del material de una sola vez como, por ejemplo, nudosidad, humedad, densidad, módulo de elasticidad dinámico.

Un tipo sería las máquinas que miden la deformación mediante la flexión en cara. La pieza se coloca apoyada en dos rodillos separados una distancia determinada, que sirven para transportar la madera en su paso por la máquina, y a medida que la pieza avanza se toma una medida cada cierto tiempo. Lo que se mide es la flecha resultante como consecuencia de una deformación. En la figura 3.24 se muestra el funcionamiento de la máquina Computermatic.

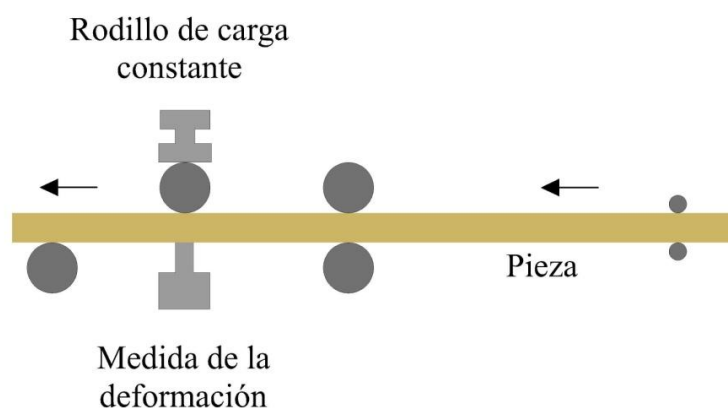


Figura 3.24 Esquema de la máquina Computermatic

Diversos fabricantes mundiales han creado clasificadoras mecánicas basadas en este concepto con variantes mínimas entre ellas, como la Cook Bolinder comercializada como SG-AF en el Reino Unido y de características similares en Finlandia llamada Timgrader.



Actualmente estas máquinas están siendo mejoradas por otras que implementan técnicas de escáner, radiaciones, ultrasonidos y técnicas vibratorias (Fernández-Golfín et al., 2001).

Sin embargo, presentan un inconveniente que es su elevado precio, por lo que es necesario su empleo en aserraderos de gran tamaño que sean capaces de amortizar su coste.

– Portátiles

Densitómetros

Una manera sencilla de para determinar la densidad de la madera es utilizando densitómetros. La densidad es un buen indicador de las propiedades mecánicas de la madera, sin embargo se trata de estimaciones que son de carácter puntual y su información debe ser complementada por otros métodos.

Los equipos más utilizados en España que siguen este tipo de principio son los que aparecen a continuación.

El penetrómetro, que se trataría de la versión mejorada del clásico punzón utilizado en la evaluación de estructuras nuevas o de rehabilitación. Se trata de un aparato derivado del esclerómetro, utilizado en hormigón.

Proyecta una aguja normalizada sobre la pieza en estudio. En función de la profundidad alcanzada se pueden estimar valores de dureza y densidad.

De los instrumentos más utilizados es el PILODYN (figura 3.25) que mediante un mecanismo de resorte efectúa un disparo, con una energía uniforme, de una aguja de acero de 2,0 a 2,5 mm de diámetro sobre la madera. La profundidad de penetración se determina mediante una escala en milímetros, parámetro que se asocia con la densidad de la madera.

Con este instrumento, se puede determinar la densidad con rapidez tanto de madera viva como en madera estructural o en postes.



Figura 3.25 Pilodyn

Otro instrumento utilizado es el resistógrafo. Se basa en la resistencia a la perforación mediante la cual se evalúa la energía que se consume al penetrar en la madera con una aguja o una broca calibrada. El aparato generalmente es portátil y posee una broca con un diámetro y una longitud determinados. Se mide la resistencia que la madera opone a la penetración de una broca a velocidad constante, medida como el consumo de potencia del motor del taladro, que podrá relacionarse con la densidad.

La potencia consumida es diferente en función de la zona que se atraviese y esas variaciones las refleja gráficamente el equipo en forma de resistograma. La resolución de la técnica es tan alta, que se pueden detectar variaciones de densidad incluso entre los anillos de crecimiento.

Se trata de una técnica muy adecuada para la inspección de estructuras en servicio ya que, con el paso del tiempo, ha sido aligerado para conseguir una relativa facilidad de transporte y uso.



Figura 3.26 Utilización del resistógrafo en árboles vivos y en estructuras de madera

La extracción de tornillos se trata de una técnica pseudo-no destructiva, que utiliza un dispositivo que registra la máxima fuerza que se precisa para arrancar un tornillo de características específicas previamente introducido en una pieza de madera.

Los resultados obtenidos se relacionan con otros ensayos tanto destructivos como no destructivos, y se estudia su valor como predictor de determinadas propiedades de la madera.

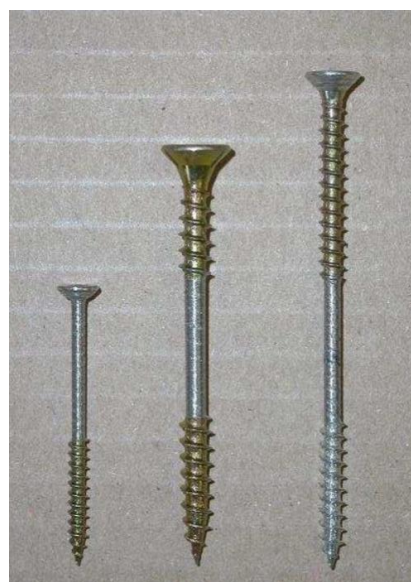


Figura 3.27 Extractor de tornillos (izquierda) y tornillos de 3, 4 y 5 mm utilizados en la extracción de tornillos (derecha)



3.8 Métodos destructivos. Ensayo a flexión

El ensayo a flexión es una técnica destructiva utilizada para determinar propiedades mecánicas de la madera. Se aplica en la industria para obtener constantes elásticas y propiedades del material a estudiar. También se aplica para medir la resistencia de diferentes elementos estructurales usados en la construcción.

En líneas generales, el ensayo consiste en colocar una pieza de madera apoyada en sus extremos y aplicar una carga, sobre dos puntos, que aumenta de manera constante. La madera al ir aumentando la carga se deforma, pero va pasando por diferentes fases.

Bajo cargas pequeñas la madera se deforma según la ley de Hooke, es decir, las deformaciones son proporcionales a las tensiones. Es en esta fase es cuando la madera se comporta como un material elástico, recuperando su forma original cuando cesa la carga. Sin embargo, cuando se sobrepasa el límite de proporcionalidad del material, se produce una deformación permanente y pasa a comportarse como un cuerpo plástico. Si se continúa aumentando la carga, se produce la rotura del material (figura 3.28).

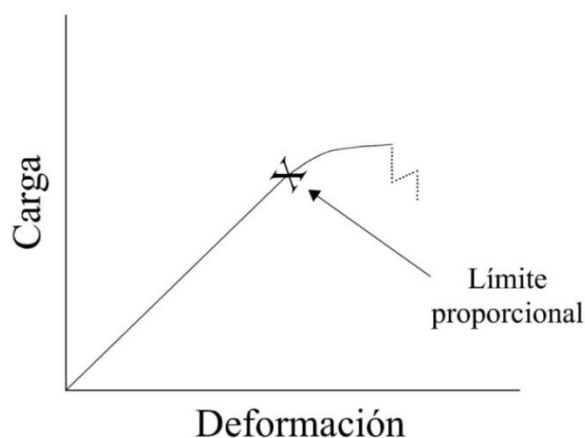


Figura 3.28 Gráfico de carga - deformación para la madera

Para los ensayos de flexión en madera, se sigue la norma EN 408: 2011. Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas.



La pieza a ensayar, libremente apoyada en sus extremos, se somete a flexión, y las fuerzas que actúan sobre ésta tienden a inducir una sollicitación de tracción en una parte de su sección transversal y, por otro lado, una sollicitación de compresión en la otra parte (figura 3.29).

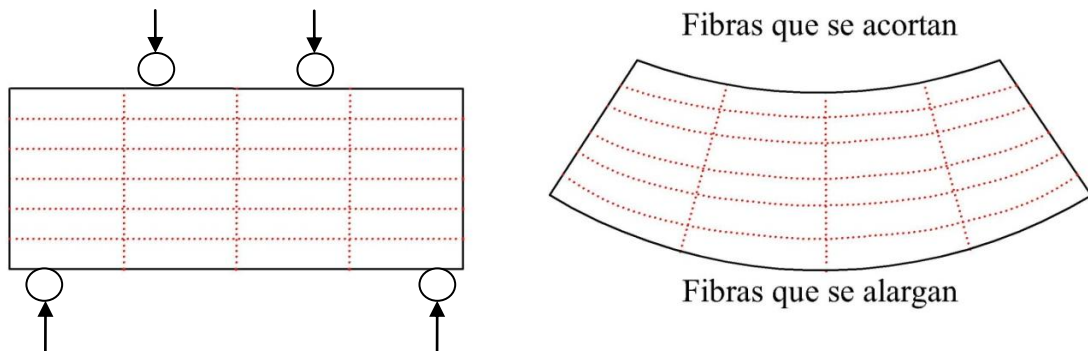


Figura 3.29 Alargamiento y contracción de las fibras

En un ensayo a flexión, se aplica una carga a una pieza, y se la somete a un momento flector, que vendrá dado por la siguiente expresión:

$$M = \frac{P \cdot a}{2}$$

siendo:

P la fuerza aplicada.

a es la distancia entre el punto de apoyo y el punto de aplicación de carga.

La figura 3.30, indica la distribución de esfuerzos por flexión, en una sección transversal cualquiera, de una probeta de sección rectangular sometida a momento flector. En este caso, el valor de la tensión normal es:

$$\sigma = \frac{M_z}{I_z} \cdot y + \frac{M_y}{I_y} \cdot z + \frac{N}{a}$$

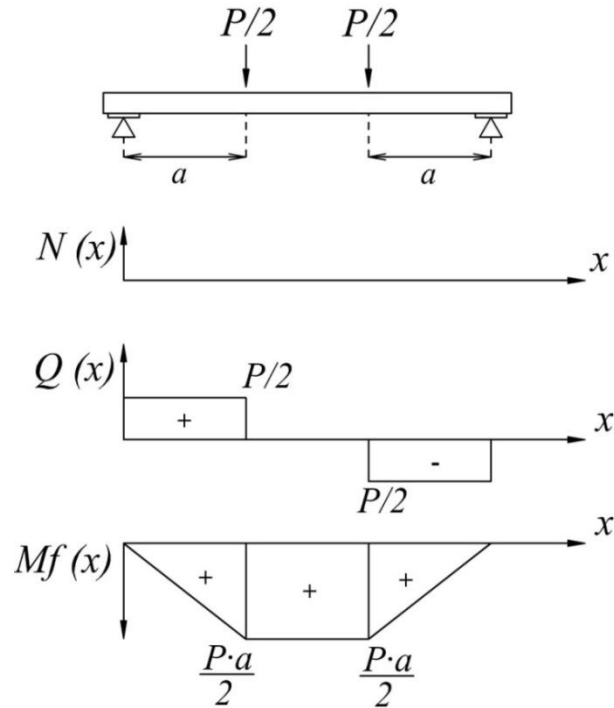


Figura 3.30 Diagramas de esfuerzos de una pieza a ensayar

Axiles no existen y momento flector con respecto al eje y tampoco.

$$\frac{I_z}{y_{max}} = W_z \rightarrow \sigma = \frac{M_z}{W_z}$$

Por lo tanto, para obtener la tensión máxima, el módulo de resistencia máximo para una sección de la pieza será:

$$W_z = \frac{b \cdot h^3 / 12}{h/2} = \frac{b \cdot h^2}{6}$$

$$\sigma = \frac{P \cdot a/2}{b \cdot h^2 / 6} = \frac{3 \cdot P \cdot a}{b \cdot h^2}$$

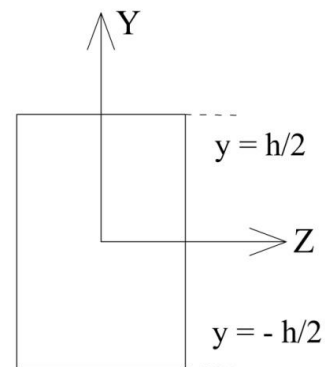


Figura 3.31 Ejes del módulo de resistencia



La fibra neutra es la línea o el eje que separa la zona comprimida de la zona fraccionada y, por lo tanto, las tensiones normales son nulas.

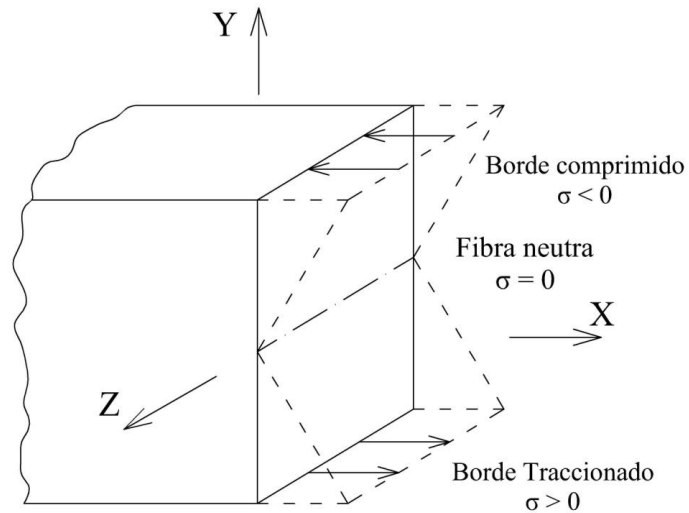


Figura 3.32 Diagrama de tensiones normales (σ) en una sección transversal de una pieza sometida a flexión

Para la medida del grado de deformación de una pieza cuando se somete a procesos de compresión o tracción se utilizan captadores de desplazamiento o extensómetros, que se colocan en contacto con la pieza a ensayar y proporcionan información acerca de la deformación originada a medida que va aumentando la carga.

Con ello, se determina la resistencia a flexión de la pieza, el módulo de elasticidad global y el módulo de elasticidad local.



4. MEDIOS Y EQUIPOS UTILIZADOS

4.1 Instalaciones

La fase experimental del proyecto se ha llevado a cabo en las instalaciones de Laboratorio de Maderas del Centro de Investigación Forestal del Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias (CIFOR-INIA).

Es allí donde ha tenido lugar el proceso de secado natural de las probetas, y donde se han realizado todos los ensayos y mediciones mediante los equipos de evaluación no destructiva y, posteriormente, los ensayos a flexión.

4.2 Clasificación visual y preparación del material de ensayo

La clasificación visual de las probetas consiste fundamentalmente en medir sus dimensiones así como el tamaño de sus defectos y singularidades. Para ello se ha hecho uso de un flexómetro de 5 m de longitud y una precisión de 1 mm, (1) (figura 4.1).

Regla milimetrada con precisión de 1 mm, para medir características o singularidades de dimensiones más pequeñas. (2)

Escuadra metálica milimetrada de 30 cm con una precisión de 1 mm (3) y rotulador permanente (4) para el marcaje de las secciones de apoyo y el centro de la pieza, así como la enumeración de ésta.

Galgas metálicas para la medir la profundidad de las fendas (5).

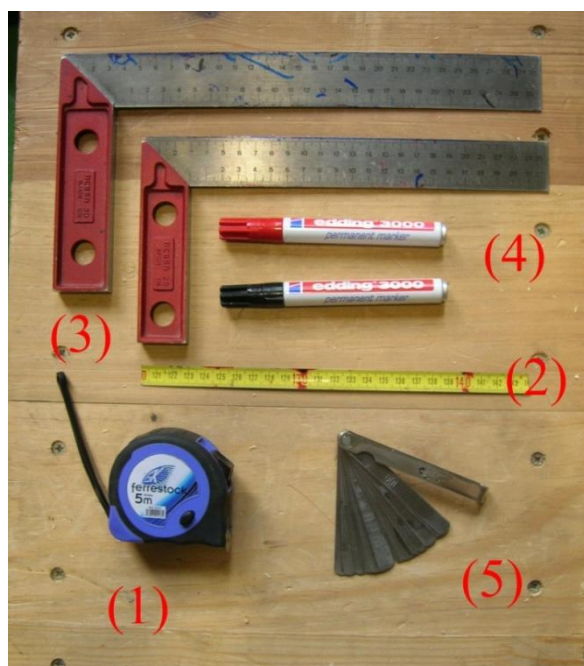


Figura 4.1 Instrumentos utilizados para la clasificación visual y la preparación de las probetas

Trazador, se trata de un instrumento utilizado para medir la presencia de desviación de fibra en la madera. Consta de una aguja que se clava superficialmente en la pieza de madera y al moverla, ésta lo hace en dirección a la fibra. La desviación de la fibra cuantifica con flexómetro.

Taladro eléctrico de marca BOSCH para realizar dos orificios en cada testa con un tope en la broca para no sobrepasar los 5 mm de profundidad.

4.3 Contenido de humedad

El contenido de humedad de las probetas se ha determinado mediante el empleo del método de resistencia eléctrica, según la norma UNE- EN 13183-2: 2002. *Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 2: estimación por el método de resistencia eléctrica se mide mediante xilohigrómetro de resistencia eléctrica.*

El equipo utilizado es de la marca GANN modelo Hydromette HTR 300 (figura 4.2), y tiene una precisión de lectura de 0,1 %.

El xilohigrómetro es un equipo que mide la resistencia que ofrece la madera al paso de una corriente eléctrica, valor que está relacionado con su contenido de humedad. Para ello, el equipo consta de un par de clavos, que se clavan en la madera y actúan de electrodos, midiéndose dicha resistencia. Éstos, a su vez, se encuentran unidos a un martillo que facilita su clavado en la madera y se conectan mediante cable eléctrico a una consola que determina el contenido de humedad de la madera y cuya pantalla refleja dicho valor.

El xilohigrómetro es necesario configurarlo previamente, introduciendo datos como la especie con la que se está trabajando y la temperatura del ambiente.

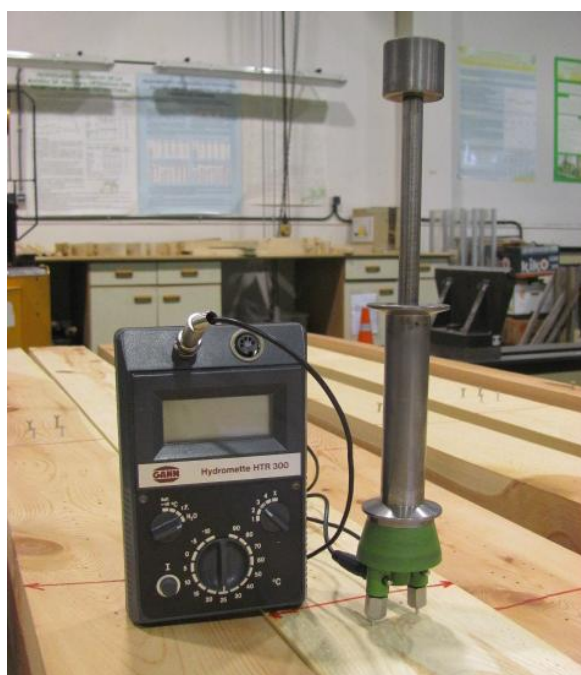


Figura 4.2 Xilohigrómetro

Para determinar la humedad de las piezas también se ha llevado a cabo otro procedimiento basado en el mismo funcionamiento del xilohigrómetro. Se han utilizado diferentes tipos de electrodos pero, a diferencia del caso anterior, han sido



previamente introducidos en la madera y, a su vez, se conectan a la consola del xilohigrómetro mediante pinzas eléctricas.

Los tipos de electrodos utilizados son los siguientes:

- Tirafondos de acero de color zinc dorado, con una longitud total de 68 mm: 58 mm de rosca y 10 mm de cuello, así como una cabeza avellanada de 9 mm de diámetro.
- Clavos convencionales de acero, con una longitud 60 mm y un diámetro de 3 mm.
- Puntas de electrodo aisladas con teflón de 60 mm de longitud y 3 mm de diámetro, con un recubrimiento aislantico central de 40 mm, de marca GANN (figura 4.3).

Las puntas aisladas son un tipo de clavo que presenta material aislante en toda su longitud, exceptuando la punta y la cabeza de éste. De esta manera se asegura que la lectura va a ser exactamente la humedad de la madera a la profundidad en la que se encuentre dicha punta.



Figura 4.3 Par de puntas de electrodo aisladas



Las pinzas son elementos que permiten conectar la consola del xilohigrómetro al par de electrodos que se encuentran clavados en la probeta, sin necesidad de utilizar los electrodos del martillo del xilohigrómetro. Se trata de pinzas metálicas que permiten el paso de la corriente eléctrica.



Figura 4.4 Pinzas utilizadas que se acoplan a los electrodos introducidos en la madera

4.4 Equipo de medición de onda acústica

Los equipos que se basan en métodos acústicos son instrumentos que permiten realizar una evaluación no destructiva del material. La información que permiten conocer es el tiempo que tarda una onda en recorrer el material en cuestión, siendo en este caso la probeta de madera en dirección longitudinal. De esta manera se puede estimar la presencia de discontinuidades o defectos en el material, ya que la existencia de éstos provocaría un aumento del tiempo de propagación de la onda a través de la probeta, por aumento de la longitud del camino recorrido.

Por ello, en el caso de la madera, que se trata de un material heterogéneo, se utiliza para detectar la existencia de defectos no apreciables a simple vista como, por ejemplo, pudriciones, vacíos u otras patologías.

Se han utilizado dos equipos diferentes: Sylvatest© Trio, de la empresa CBS CBT y Microsecond Timer de la empresa Fakopp.

El Sylvatest© Trio es un equipo basado en la propagación de una onda acústica de frecuencia ultrasónica (por encima de los 20 kHz) a través de la madera. El equipo consta de dos transductores que tienen el extremo cónico y se introducen en unos orificios previamente realizados en la madera.

El transductor emisor, manda una serie de pulsos que son captados por el receptor. Por ello, éstos se colocan en los puntos entre los que se quiere medir el tiempo de propagación de la onda. La precisión de lectura del equipo es de 1 μ s.

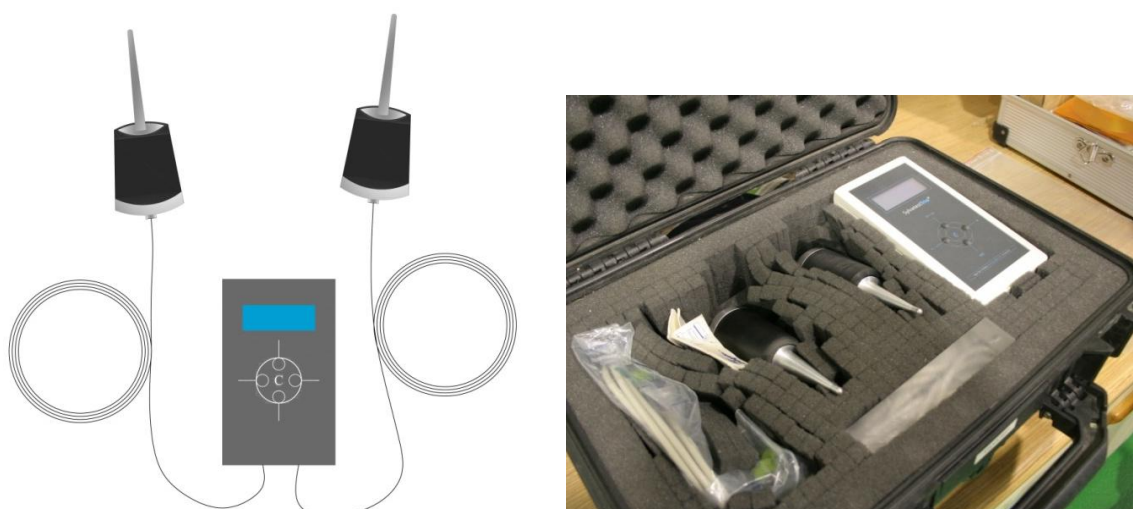


Figura 4.5 Equipo Sylvatest © Trio

Microsecond Timer de Fakopp también es un instrumento con el que obtiene el tiempo que tarda una onda en recorrer la distancia entre dos puntos. Sin embargo, a diferencia de Sylvatest, se trata de una onda de impacto de frecuencia sónica (en torno a 23 kHz).

El equipo consta de dos sensores que se clavan en la madera en dichos puntos y, mediante excitación mecánica producida mediante golpeo con martillo en uno de los sensores, se origina la onda que recorre la longitud de la pieza. Al igual que en el equipo anterior, la precisión de lectura es de 1 μ s.



Figura 4.6 Equipo Microsecond Timer

4.5 Análisis de vibraciones

El equipo utilizado para realizar el análisis de vibraciones es el Portable Lumber Grader (PLG) de la empresa Fakopp. Se basa en el análisis de la frecuencia natural de vibración de una pieza una vez que ésta ha sido puesta en vibración. La frecuencia natural de vibración de una pieza prismática de un material determinado es un fenómeno que se relaciona con algunos parámetros, como con sus propiedades físicas y mecánicas.

El equipo consta de los siguientes elementos:

- Balanza con unas dimensiones de 250 x 75 x 90 mm., con una resolución de 10 g y una capacidad máxima para 125 kg.
- Micrófono unidireccional con una sensibilidad de -56 dB (0dB = 1 V/ mbar a 1000 Hz) y con un rango de frecuencia de 100 – 15.000 Hz. Temperatura de trabajo entre 5 y 40 °C.
- Ordenador con un software instalado, con unos requerimientos mínimos de: sistema operativo Windows 95 o superior, velocidad de procesador de 100 MHz, resolución de monitor de 600 x 800 píxeles, tarjeta de sonido de 16 bits y 1 MB de espacio libre en el disco duro.

- Martillo de golpeo, para poner en vibración la probeta.

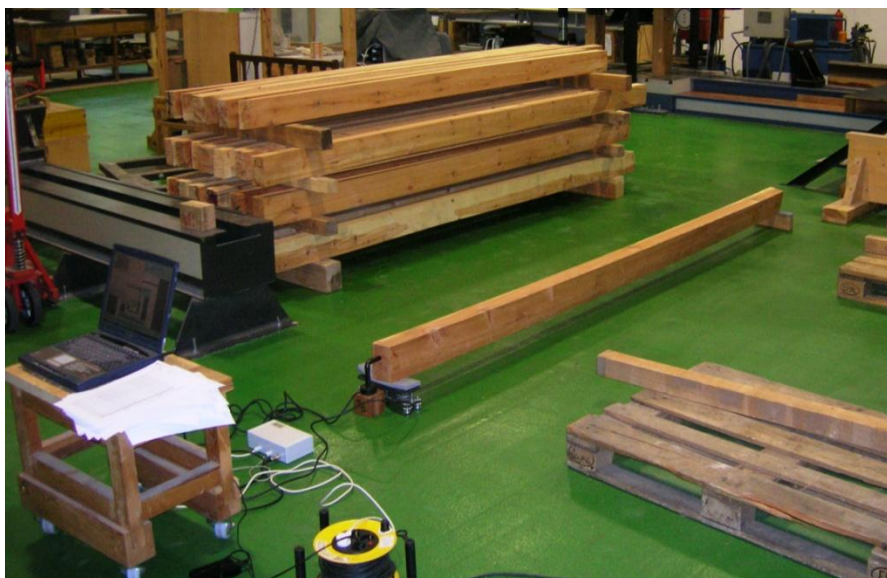


Figura 4.7 Ensayo de una probeta con el equipo Portable Lumber Grader

De esta manera, la utilización de este equipo permite conocer los siguientes parámetros:

- Masa de la mitad de la pieza
- Frecuencia de vibración longitudinal
- Clase resistente
- Módulo de elasticidad dinámico

4.6 Ensayo a flexión

El ensayo a flexión se realiza según la norma UNE-EN 408: 2011. *Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas.*



Para ello, se ha utilizado un pórtico de ensayos hidráulico marca Ibertest modelo PFIB 600-300W (figura 4.8), dotado de una célula de carga de 600 kN a escala 1/5 y 1/1.



Figura 4.8 Pórtico de ensayos a flexión Ibertest PFIB 600-300W

Para la medida de las deformaciones y, en definitiva, de los módulos de elasticidad se utilizan captadores de desplazamiento o extensómetros marca HBM modelo WA de 20 mm y de 50 mm (figura 4.9).



Figura 4.9 Extensómetros HBM WA de 20 y 50 mm

5. METODOLOGÍA

5.1 Material de ensayo

El material sobre el que se realiza el estudio consta de 26 probetas de madera aserrada de pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.), cuya procedencia es El Espinar, Segovia, y con unas dimensiones nominales de 3000 x 150 x 100 mm.

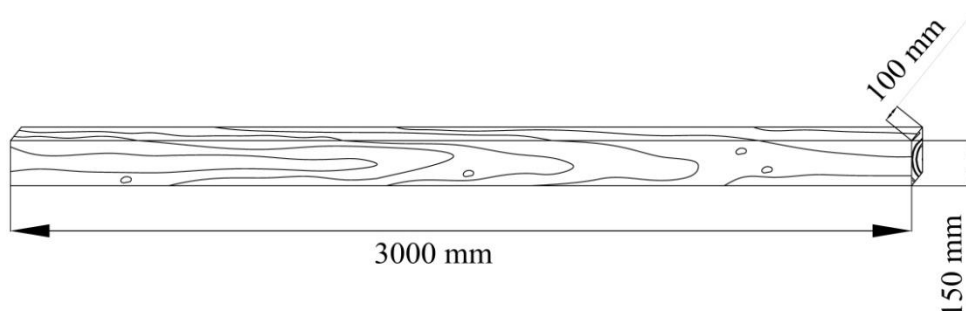


Figura 5.1 Probeta de ensayo con sus dimensiones nominales

Las dimensiones reales iniciales (en mm) de las probetas se muestran en la tabla 5.1.

| Probeta | Longitud | Cara | Canto |
|---------|----------|------|-------|
| PS-01-H | 3140 | 145 | 95 |
| PS-02-H | 3292 | 144 | 94 |
| PS-03-H | 3300 | 144 | 95 |
| PS-04-H | 3148 | 144 | 95 |
| PS-05-H | 3430 | 144 | 94 |
| PS-06-H | 3102 | 144 | 95 |
| PS-07-H | 3568 | 144 | 96 |
| PS-08-H | 3080 | 144 | 95 |
| PS-09-H | 3109 | 145 | 94 |
| PS-10-H | 3087 | 144 | 94 |
| PS-11-H | 3238 | 144 | 95 |
| PS-12-H | 2975 | 145 | 95 |
| PS-13-H | 2984 | 145 | 96 |

| Probeta | Longitud | Cara | Canto |
|---------|----------|------|-------|
| PS-14-H | 3211 | 145 | 96 |
| PS-15-H | 3335 | 142 | 97 |
| PS-16-H | 3310 | 145 | 96 |
| PS-17-H | 3326 | 144 | 95 |
| PS-18-H | 3105 | 144 | 96 |
| PS-19-H | 3075 | 144 | 93 |
| PS-20-H | 3230 | 145 | 96 |
| PS-21-H | 3090 | 144 | 94 |
| PS-22-H | 3152 | 144 | 95 |
| PS-23-H | 3348 | 144 | 95 |
| PS-24-H | 3420 | 145 | 95 |
| PS-25-H | 3100 | 145 | 96 |
| PS-26-H | 3296 | 146 | 95 |

Tabla 5.1 Dimensiones reales iniciales las 26 probetas

Las piezas se colocan de canto, apiladas sobre rastreles y con una separación entre ellas adecuada, que permita la circulación de aire en el interior de la pila para el

correcto y uniforme secado natural de ésta. La pila se forma mediante piezas dispuestas en filas, procurando que el espaciamiento entre ellas en la zona inferior sea mayor que en la parte superior. Para ello se colocan menos piezas en las dos filas inferiores que en las dos superiores (figura 5.2).

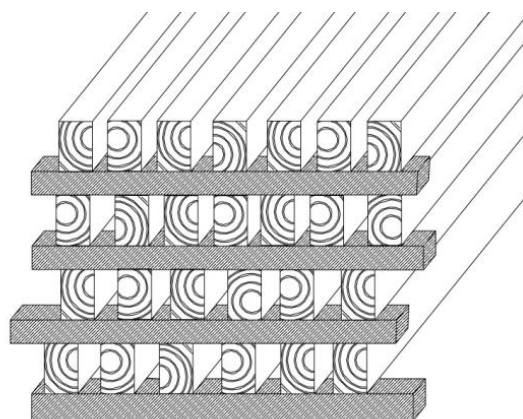


Figura 5.2 Detalle de la pila

5.2 Desarrollo experimental

5.2.1 Clasificación visual

En el aserradero, con las probetas recién aserradas, se seleccionan visualmente, descartando aquellas que tuvieran demasiados defectos y singularidades como, por ejemplo, nudos de gran tamaño, gemas de gran longitud o una desviación de fibra considerable.



Figura 5.3 Probetas dispuestas en el aserradero previamente a su selección visual

Una vez seleccionadas, se llevan al laboratorio de madera CIFOR-INIA y, una vez allí, se lleva a cabo una primera clasificación visual de acuerdo a la norma EN 56544: 2009 *Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas*.

En ella es necesario medir la dimensión de todas las características y singularidades de la madera, recogiendo dichos datos en un estadillo (Anexo A. Estadillo para la clasificación visual) y comprobar que éstas se encuentren dentro de los límites que impone la norma.



| CRITERIOS DE CALIDAD | | MEG |
|--|-----------------------------------|--|
| DIÁMETRO DE LOS NUDOS SOBRE LA CARA (h) | | $d \leq 2/3$ de “h” |
| DIÁMETRO DE LOS NUDOS SOBRE EL CANTO (b) | | $d \leq 2/3$ de “b” |
| ANCHURA MÁXIMA DEL ANILLO DE CRECIMIENTO - Pino silvestre | | Sin limitación |
| FENDAS | De secado | $f \leq 3,5$ Las fendas de contracción solo se considerarán si su longitud es mayor que la menor de las dimensiones siguientes: $1/4$ de la longitud de la pieza y 1 m. |
| | Rayo Abolladura Abatimiento | No permitidas |
| ACEBOLLADURAS | | No permitidas |
| BOLSAS DE RESINA Y ENTRECASCO | | Se admiten si su longitud es menor o igual a $1,5 \cdot h$ |
| MADERA DE COMPRESIÓN | | Admisible en $2/5$ de la sección o de la superficie externa de la pieza |
| DESVIACIÓN DE LA FIBRA | | 1:6 (16,7 %) |
| GEMAS - Longitud - Dimensión relativa | | $\leq 1/3$ de “L” $g \leq 1/3$ |
| MÉDULA ⁽¹⁾ | | Admitida |
| ALTERACIONES BIOLÓGICAS - Muérdago (<i>V. album</i>) - Azulado - Pudrición - Galerías de insectos xilófagos | | No se admiten Se admiten No se admiten No se admiten |
| DEFORMACIONES MÁXIMAS ⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾ - Curvatura de cara - Curvatura de canto - Alabeo - Abarquillado | | 20 mm (para una longitud de 2 m) 12 mm (para una longitud de 2 m) 2 mm (por cada 25 mm de “h”) (para una longitud de 2 m) $1,25$ de “h” |
| (1) Estos criterios solo se considerarán cuando se comercializa madera en húmedo | | |
| (2) Estos criterios solo se considerarán cuando la clasificación se efectúa en húmedo | | |
| (3) Referidas a un 20 % de contenido de humedad | | |
| (4) Pueden aceptarse deformaciones mayores siempre que no afecten a la estabilidad de la construcción (porque puedan corregirse durante la fase de montaje) y existe acuerdo expreso al respecto entre el suministrador y el cliente | | |

Tabla 5.2 Especificaciones para la clasificación de piezas de sección rectangular con anchura $b > 70$ cm (Norma UNE-EN 56544: 2009)

De esta manera, las probetas que se encuentren dentro de la norma pertenecen a la clase visual MEG, mientras que las que no cumplan son piezas de rechazo.



También se determina el C.K.D.R. (Concentrated Knot Diameter Radio) así como su posición en relación al centro de la pieza. El C.K.D.R. es el porcentaje, en tanto por uno, del tamaño de los nudos presentes en la peor sección de la probeta con respecto al tamaño de dicha sección (perímetro). Se entiende por peor sección aquella que contiene mayor proporción de nudos en la pieza, en número o en cantidad.

$$C.K.D.R. = \frac{\phi i}{2 \cdot h + 2 \cdot b}$$

donde

ϕi es la suma del diámetro de los nudos, en dirección perpendicular al eje de la pieza, de la peor sección de la probeta, en mm.

h es la cara de la probeta, en mm.

b es el canto de la probeta, en mm.

La misma clasificación visual se realiza cada cierto tiempo para observar la evolución y/o aparición de singularidades en la madera a lo largo de su proceso de secado y comprobar si las piezas siguen dentro de las especificaciones de la calidad visual MEG.

5.2.2 Preparación del material

Antes de realizar las mediciones para determinar las distintas variables, es necesario preparar el material de ensayo para poder utilizar los equipos y llevar a cabo los procedimientos anteriormente descritos.

Con respecto a la utilización del equipo de ultrasonidos, es necesario realizar un par de orificios en cada testa para colocar el extremo de los transductores del equipo de ultrasonidos (Sylvatest Trio).

Los orificios se realizan a una distancia del canto de la probeta de $1/3$ de la longitud de la cara y el otro a una distancia de $2/3$ de la misma longitud; es decir a 50 mm y a 100 mm respectivamente (figura 5.4).

Los orificios se realizan con taladro dotado de un tope para no sobrepasar los 5 mm de profundidad y, así, poder colocar el extremo del transductor. De igual forma, separados unos milímetro de los orificios, es necesario realizar un par de marcas en cada testa, correspondientes a los puntos donde se van a clavar los transductores de Microsecond Timer. El par de orificios superiores (1) corresponden al lugar donde se clavan los transductores de Microsecond Timer, y el par inferior (2), donde se introduce los de Sylvatest Trio (figura 5.4).



Figura 5.4 Detalle de los orificios realizados en una de las testas para la medida de los ultrasonidos

Durante la realización de dichos trabajos la única variable que se determina es la humedad de la madera mediante xilohigrómetro utilizando su martillo, ya que las probetas se están adecuando para la medición con equipos NDT y los electrodos se han de introducir en la madera.

Por ello, a pesar de no poder determinarse los parámetros relacionados con los ultrasonidos y la vibración, se mide el contenido de humedad para observar la evolución.



Referente a la determinación del contenido de humedad de las probetas, por medio de los diferentes electrodos, es necesario realizar una preparación previa. Como se ha explicado, es necesario introducir diferentes tipos de electrodos en la madera que sirven para medir el contenido de humedad en ésta.

Un par de tirafondos y otro par de clavos convencionales se colocan en cada una de las 26 probetas a una profundidad de $\frac{1}{3}$ de b (del canto) mientras que el par de puntas aisladas a la profundidad de $\frac{1}{2}$ de b se colocan, por razones económicas, en cuatro de éstas (figura 5.5).

Más tarde se colocan, también, los pares de puntas aisladas a la profundidad de $\frac{1}{3}$ de b en 5 piezas.

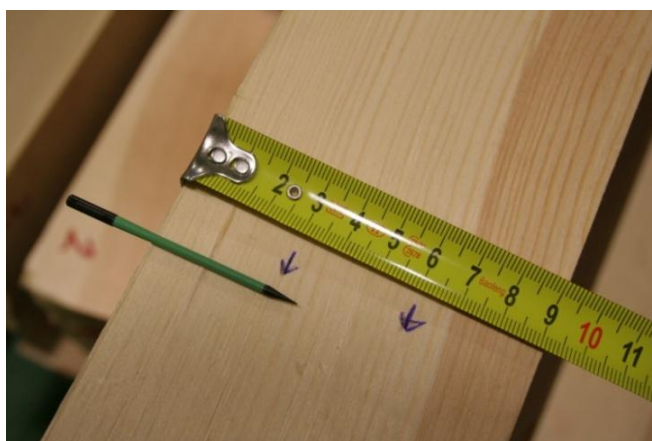


Figura 5.5 Los electrodos se clavan a la profundidad de $\frac{1}{3}$ ó $\frac{2}{3}$ de " b "

El contenido de humedad de la madera, según indica la norma EN13183-2: 2002, ha de medirse en dirección a la fibra, a menos que las instrucciones del equipo indiquen otra forma.

En este caso, las instrucciones del xilohigrómetro utilizado indican que dicha medición se realice introduciendo los electrodos de manera perpendicular a la fibra y al eje longitudinal de la probeta.

En dirección longitudinal, los electrodos se colocan de la siguiente manera (figura 5.6): el primer par, en este caso los tirafondos, se coloca a 1 m de la testa, y después,

el resto, separados entre si 50 mm. A la izquierda de la figura 4.6 se tiene: (1) tirafondos, (2) clavos convencionales, (3) puntas aisladas a profundidad de $1/2$ de b y (4) puntas aisladas a profundidad de $1/3$ de b .

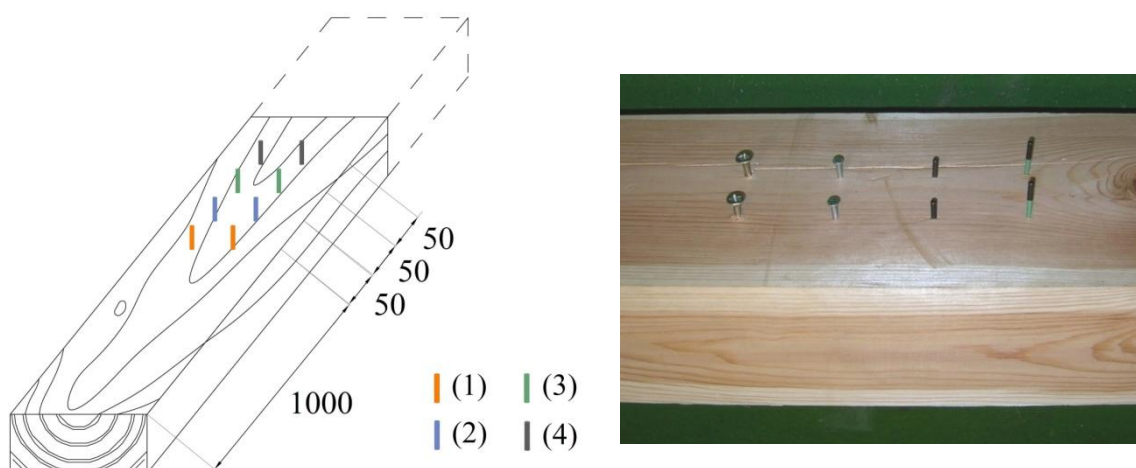


Figura 5.6 Detalle de los diferentes tipos de electrodos introducidos en la madera (medidas en mm)

De esta manera, se llevan a cabo cinco medidas del contenido de humedad con xilohigrómetro, pero mediante procedimientos diferentes:

- Haciendo uso del martillo acoplado a los electrodos que se clavan en la probeta cada vez que haya que medir la variable (HX).
- Conectando el xilohigrómetro al par de tirafondos previamente introducidos en la pieza a la profundidad de $2/3$ de b (HT).
- Conectando al par de clavos convencionales previamente introducidos en la pieza a la profundidad de $1/3$ de b (HC).
- Conectado al par de puntas aisladas introducidas en la pieza a una profundidad de $1/2$ de b (HA).
- Igual que el anterior pero las puntas aisladas se encuentran clavadas a $1/3$ de b (HL).

Es importante medir las variables relativas a la humedad y las de onda acústica el mismo día ya que, en caso contrario, no se pueden llevar a cabo un análisis de

comparación entre ambas. Por este motivo, no se pudo realizar mediciones de onda acústica de manera previa a la preparación del material en lo relativo a la medida de humedad.

Finalizadas las operaciones anteriores, ya se puede realizar la determinación de todas las variables un mismo día: contenido de humedad con los cinco procedimientos, mediación de ultrasonidos con los dos equipos y análisis de vibraciones.

5.2.3 Medición con equipos basados en métodos acústicos

Finalizados los trabajos relacionados con la preparación del material, el primer ensayo que se realiza es la medición con el equipo de ultrasonidos en las 26 probetas. Tal y como se colocaron las vigas en la medición anterior, se determina el tiempo que tarda una onda en recorrer la longitud de la probeta. Para ello se utilizan los equipos Sylvatest Trio y Microsecond Timer.

Los transductores del equipo de Sylvatest Trio se colocan en los orificios realizados mediante el taladro en cada testa. Una vez colocados, el emisor emite una serie de pulsos y la consola calcula el tiempo que tarda la onda en llegar al receptor y realiza la media aritmética entre los tiempos de los diferentes pulsos. Posteriormente se hará referencia a Sylvatest Trio con la letra S.

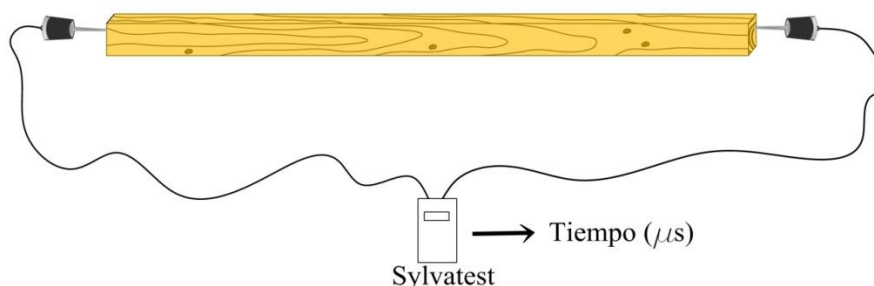


Figura 5.7 Equipo Sylvatest Trio con los transductores colocados en cada testa

En el caso de Microsecond Timer, los transductores se clavan en las marcas realizadas en las testas, tratándose de ondas de impacto que se generan por golpeo de martillo en el emisor. Más adelante, se hará alusión a este equipo con la letra F.

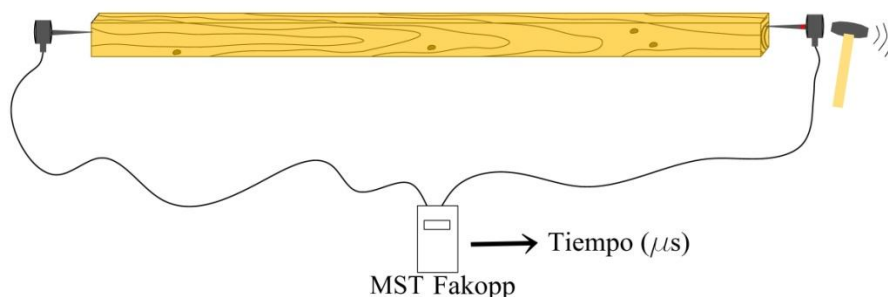


Figura 5.8 Equipo Microsecond Timer con los transductores colocados en cada testa

En cada probeta, se realizan dos medidas y se obtiene la media aritmética entre ambas: una colocando cada transductor en el orificio superior de cada testa y otra mediación colocándolos en los orificios inferiores (figura 5.9). De esta manera se puede comprobar si existe un defecto en alguna zona del interior de la madera, ya que se registrarían tiempos mayores y poco coherentes.

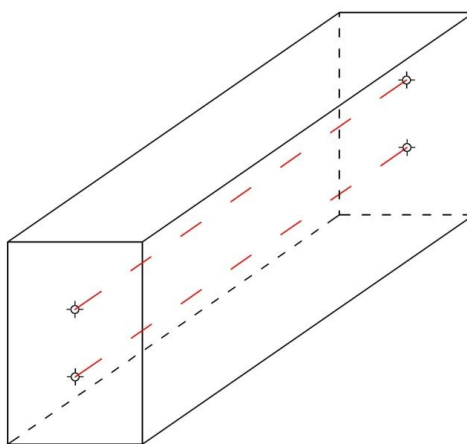


Figura 5.9 Trayectorias de cada medición con cada equipo acústico

Conocido el tiempo que tarda la onda en recorrer la distancia entre los transductores y dicha distancia, que se corresponde con la longitud de la viga, se obtiene la



velocidad de propagación de la onda a través de la ecuación del movimiento rectilíneo y uniforme.

$$V = \frac{L}{1000 \cdot T}$$

donde

V es la velocidad de propagación de la onda, en m/s

L es la longitud de la probeta, en mm

T es el tiempo que tarda la onda en recorrer la probeta, en μs

En resumen, se utilizan dos equipos diferentes para obtener la velocidad de propagación de la onda a través de las probetas:

- Sylvatest Trio (S)
- Microsecond Timer., que utiliza (F)

5.2.4 Medición del contenido de humedad

La determinación del contenido de humedad se lleva a cabo a través de los procedimientos descritos, mediante un xilohigrómetro de resistencia eléctrica.

Los electrodos del xilohigrómetro se clavan en la madera de tal manera que alcancen la profundidad de 1/3 de b, indicada por la norma EN 13183-2, y en dirección perpendicular a la fibra.

Primero se realizan las mediciones a través del xilohigrómetro con martillo (figura 5.10) y, seguidamente, se mide la humedad a partir de los clavos o electrodos introducidos en la madera.

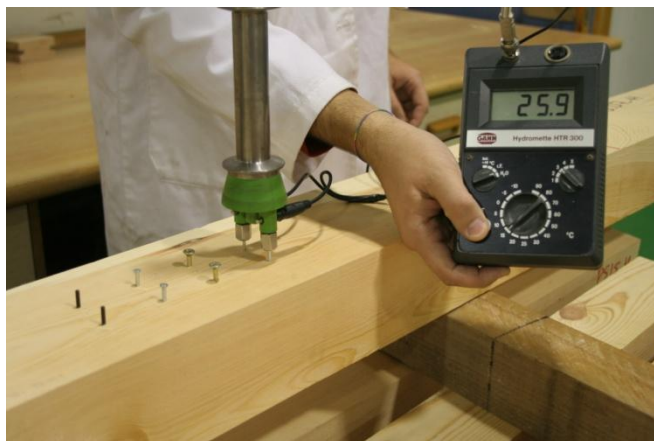


Figura 5.10 Medida del contenido de humedad de una probeta a través del xilohigrómetro con martillo (HX).

Los extremos del cable del xilohigrómetro se conectan a unas pinzas metálicas y éstas, a su vez, se abrazan al par de electrodos (figura 5.11). Es importante que la pinza este en contacto con par de electrodos correspondientes y no toque otro electrodo o la superficie de la madera, ya que la lectura no sería correcta.

Con los electrodos previamente introducidos en la madera el proceso resulta más sencillo ya que no es necesario clavar los electrodos cada vez que se mida la humedad como en el caso de utilizar el xilohigrómetro de forma ordinaria.

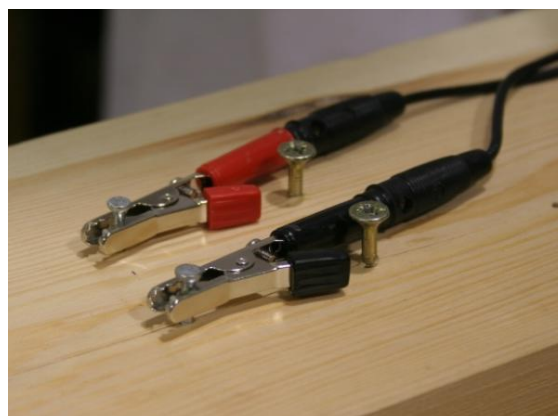


Figura 5.11 Medida del contenido de humedad de una probeta a través de electrodos clavados en ésta. A la izquierda HT y a la derecha HC.

Los clavos utilizados a modo de electrodos se han fabricado con diferente composición y forma entre ellos. La principal diferencia se da entre las puntas con material aislante y el resto de electrodos. Como ya se ha explicado en el apartado 4.3 de materiales, dichas puntas presentan un recubrimiento de teflón en su cuerpo, actuando de aislante, y quedando al descubierto la cabeza y la punta de ésta, siendo, por lo tanto, solamente estas partes conductoras de la electricidad, , mientras que en el resto de electrodos todo su cuerpo es conductor.

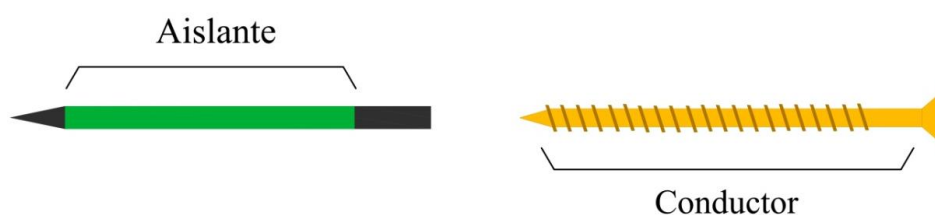


Figura 5.12 Punta aislada y tirafondo con sus zonas aislantes y conductoras

Exceptuando las puntas aisladas (HA), introducidas a una profundidad de 1/2 del canto, y los tirafondos (HT), introducidos a 2/3 del mismo, el resto de electrodos se encuentran clavados en la probeta a la misma profundidad, indicada según la norma UNE- EN 13183-2:2002, por lo que, teóricamente, la profundidad a la que miden la humedad las puntas aisladas es mayor que en el resto, exceptuando los tirafondos.

En la figura 5.13 la línea roja representa la zona de contacto del electrodo con la madera. En el caso del tirafondo o el clavo, todo el cuerpo del electrodo esta descubierto y en contacto directo con la madera, por lo que, a pesar de que el xilohigrómetro refleja el contenido de humedad mayor a lo largo de la longitud de dicho electrodo, no esta muy claro a que profundidad se esta midiendo el contenido de humedad. En el caso de las puntas aisladas, el contenido de humedad que se determina es exactamente el de la profundidad indicada.

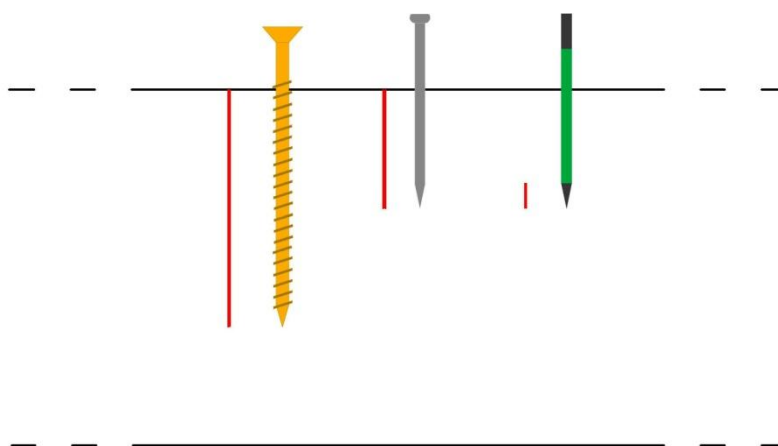


Figura 5.13 Electrodos clavados en la probeta reflejándose, mediante la línea roja, la parte conductora de éstos

La pérdida de humedad de la madera se produce por liberación de ésta a la atmosfera. Esta liberación se produce desde las zonas más internas y de mayor profundidad hacia el exterior, por lo que la parte de mayor contenido de humedad es la más profunda, ya que es la que más tiempo tarda en liberarla, es decir, el centro de la probeta.

Por este motivo, en el caso de utilizar tirafondos (HT), el electrodo pasa por el centro de la sección de la probeta y, por ello, los valores de contenido de humedad deberían ser algo mayores que los del resto de electrodos. Si se utilizan puntas aisladas (HA y HL) como electrodos, las lecturas del xilohigrómetro, teóricamente deberían ser, a su vez, mayores que las del resto de electrodos sin aislar (HX y HC).

Como las piezas se encuentran formando una pila y unas se encuentran encima de otras, el contenido de humedad de las piezas no se puede determinar de manera seguida, por lo que se empieza a medir por las piezas de la fila superior. Una vez medida la humedad de las probetas de la primera fila, se van colocando una a una en el equipo de análisis de vibraciones. De esta forma, la pila se va descargando permitiendo la determinación de la humedad en el resto de las probetas.

5.2.5 Análisis de vibración

El equipo de vibración utilizado es el Portable Lumber Grader (PLG) (figura 5.14).

La pieza se coloca de canto, apoyándose un extremo sobre una balanza y el otro sobre el apoyo. El equipo consta de un micrófono que recoge la vibración longitudinal que recorre la viga y que se coloca cercano a una de las testas, pero no en contacto.

La vibración es generada mediante un impacto con martillo sobre la testa contraria a donde se ha ubicado el micrófono. Balanza y micrófono se conectan a un ordenador que, a partir de un software, obtiene la información detallada en el apartado 4.5.

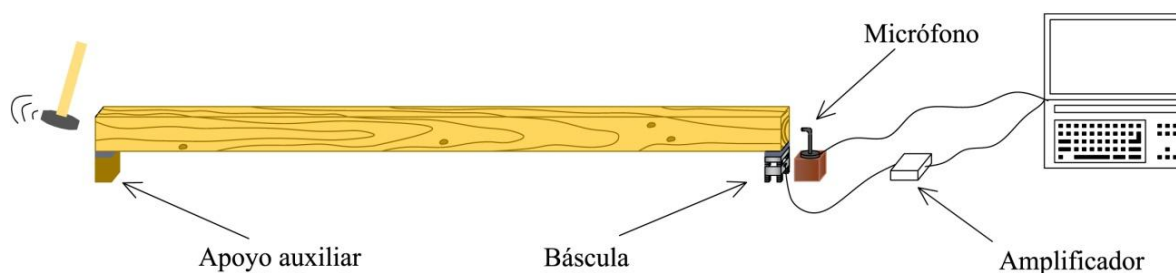


Figura 5.14 Equipo Portable Lumber Grader con sus diferentes componentes

Según se va midiendo la humedad de las piezas, se van colocando en el equipo de medida de frecuencia de vibración. Antes de realizar el ensayo se debe tarar la balanza.

Una vez colocada la pieza es necesario introducir datos en el software: las dimensiones de la pieza, con lo que se determina la densidad, el C.K.D.R. (Concentrated Knot Diameter Radio) así como el valor del contenido de humedad actual corregido con respecto a un valor de referencia del 12%.

Una vez generada la vibración, el micrófono recoge la señal y, pasando por un amplificador, es procesada por el software determinando la frecuencia de vibración mediante la transformada rápida de Fourier. A partir de la frecuencia de vibración



longitudinal y la longitud de la pieza se obtiene la velocidad de propagación de la onda:

$$v = \lambda \cdot f \rightarrow v = (2 \cdot l) \cdot f$$

donde:

λ es la longitud de onda (m), siendo $\lambda = 2 \cdot l$

l es la longitud de la pieza (m)

f es la frecuencia (Hz)

Para el cálculo de la densidad, se tiene:

$$\rho = \frac{2 \cdot m_{1/2}}{b \cdot h \cdot l}$$

donde:

ρ es la densidad, en kg/m^3

$m_{1/2}$ es la mitad de la masa de la pieza, en kg

b es el ancho (canto) de la pieza, en m

h es la altura (cara) de la pieza, en m

l es la longitud de la pieza, en m

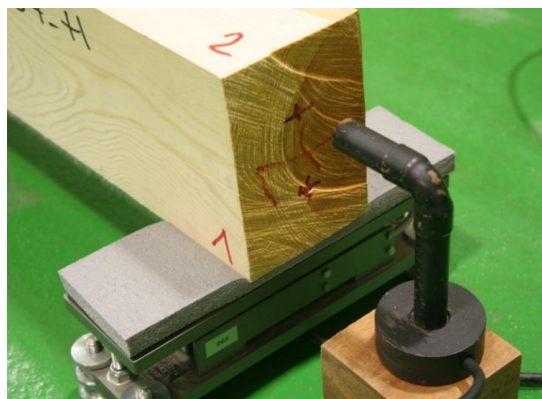


Figura 5.15 Detalle de la balanza y el micrófono del equipo

El PLG será mencionado con la letra P en el capítulo de resultados.

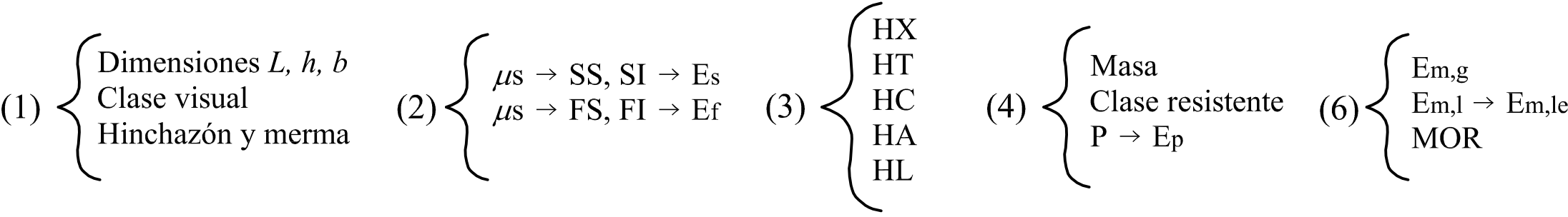
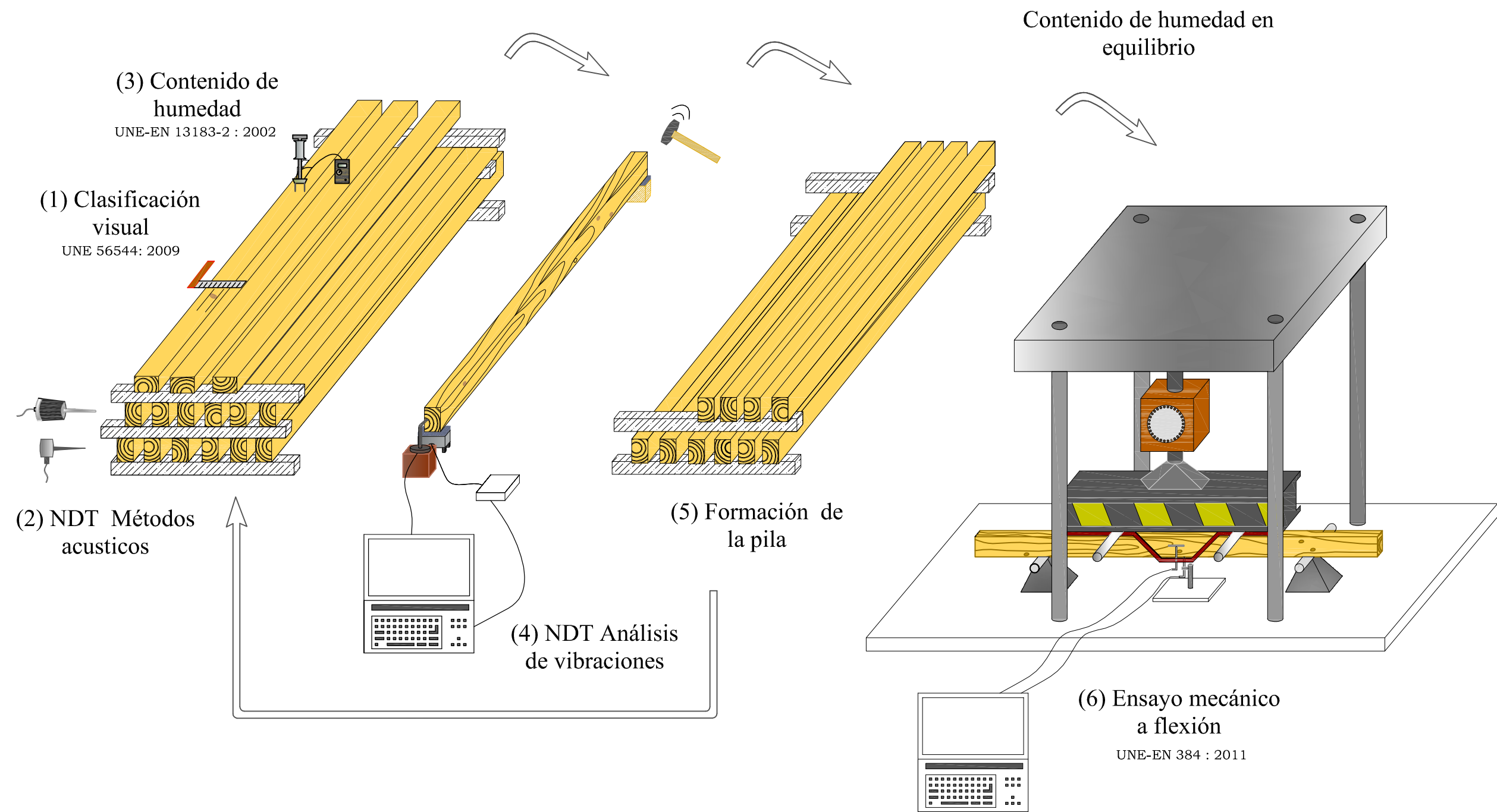
5.2.6 Formación de una nueva pila

Finalizado el ensayo relativo al análisis de vibraciones de cada probeta, éstas se colocan en un lugar diferente, formando una pila para continuar el proceso de secado hasta el siguiente día de medición. De esta manera, las probetas que inicialmente se encontraban en la parte inferior de la pila pasan a ocupar posiciones en la parte superior.



Figura 5.16 Formación de una nueva pila

DESARROLLO EXPERIMENTAL



Variables que se obtienen en cada trabajo

5.2.7 Preparación del material para los ensayos a flexión

Cuando las probetas han alcanzado el contenido de humedad de equilibrio, es decir, cuando el contenido de humedad de la madera sufre variaciones muy leves y los cambios dimensionales son también muy pequeños, las probetas están en condición de ser ensayadas a flexión.

Con carácter previo a la realización del ensayo, es necesario preparar las probetas para la obtención de la información necesaria.

Se coloca una placa metálica en el centro de la luz y sobre la fibra neutra de la pieza, en dirección perpendicular a la sección central, quedando paralela al canto de ésta.

También, se introduce un par de tirafondos en la misma cara separados una distancia $5 \cdot h$ entre ellos, es decir, $2,5 \cdot h$ de la sección central, que servirán de sujeción a la “percha” o “regla” que, a su vez, porta uno de los extensómetros para la medida del módulo de elasticidad local.

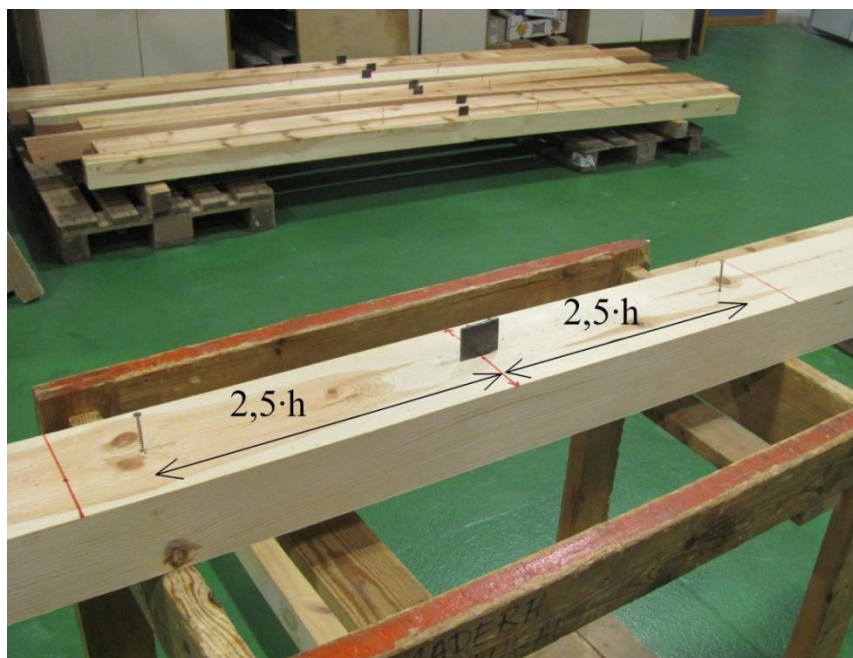


Figura 5.17 Preparación de la probeta antes del ensayo a flexión



5.2.8 Ensayos a flexión

La colocación de los apoyos, tanto superiores como inferiores, se realiza de acuerdo a la norma EN 408: 2011. Los apoyos inferiores con una separación de $18 \cdot h$, es decir 2700 mm entre ellos, mientras que los superiores distan $6 \cdot h$, siendo 900 mm.

La probeta queda simplemente apoyada. Es importante que el contacto entre los apoyos y el canto de la probeta sea perfecto, por lo que si la probeta tiene algún tipo de singularidad o defecto relacionado con el secado, como alabeo o curvatura, es necesario colocar una pequeña cuña en alguno de los apoyos para que el canto del tercio central quede paralelo al suelo.

La velocidad de avance de la carga es de 0,10 kN/s, valor que se encuentra por debajo del límite que marca la norma UNE-EN 408: 2011, que establece una velocidad de avance máxima de $0,003 \cdot h$ mm/s, es decir inferior a 0,45 mm/s.

– Modulo de elasticidad local

Se mide la deformación en un tramo de longitud cinco veces la altura de la sección ubicado en el tercio central, por lo que se trata de un módulo en flexión pura, sin que afecten los cortantes (Fernández-Golfín, 2003). Se utiliza un extensómetro de 20 mm que estará en contacto con una placa de acero colocada en la fibra neutra, en sentido longitudinal.

Para ello el extensómetro queda sujeto mediante una percha que mantiene la verticalidad del mismo y, a su vez, ésta se coloca sobre los dos tirafondos introducidos en la probeta separados entre ellos una distancia de $5 \cdot h$. El extensómetro registra la deformación que sufre la pieza, durante el tramo elástico, a medida que la carga aumenta y, de esta manera, se obtiene el modulo de elasticidad.

$$E_{m,l} = \frac{a \cdot l_1^2 \cdot (F_2 - F_1)}{16 \cdot I \cdot (w_2 - w_1)}$$



donde:

$F_2 - F_1$ es el incremento de carga que se produce en el tramo elástico de una probeta sometida a flexión correspondiente al tramo de línea continuo (figura 5.18)

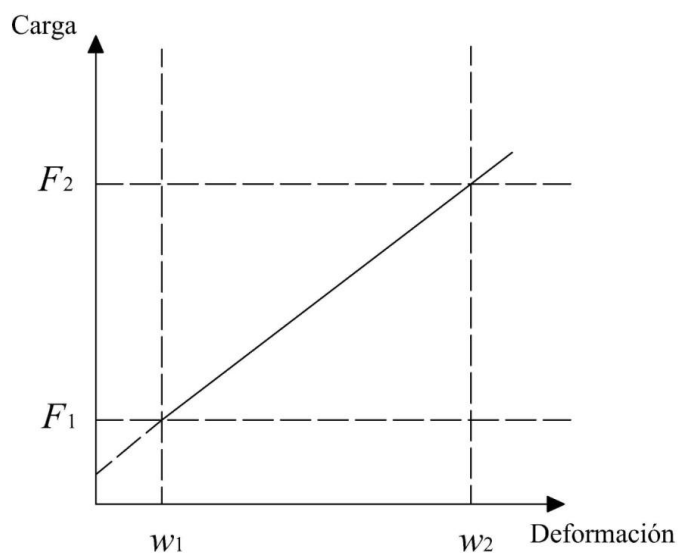
$w_2 - w_1$ es el incremento de deformación al pasar de una carga F_1 a otra F_2 , en mm.

a es la distancia entre el punto de apoyo y el punto de aplicación de carga más cercano, en mm.

l_1 es la longitud del vano en el que se miden las deformaciones, en mm.

I es el momento de inercia de la sección de rotura en mm^4 .

El término $(F_2 - F_1) / (w_2 - w_1)$ puede reemplazarse por la pendiente de la recta relación entre carga y deformación del tramo elástico.



*Figura 5.18 Grafico de carga-deformación dentro de los márgenes de deformación elástica
(Norma UNE-EN 408)*



Los extensómetros se colocan en sus correspondientes posiciones, y miden la deformación producida en el tramo elástico de la probeta, es decir, hasta la carga máxima necesaria para la determinación del módulo de elasticidad local. Una vez que se llega a dicho valor, la carga se detiene hasta que se retiran los extensómetros, y se continúa aplicando carga, ya en el tramo inelástico.

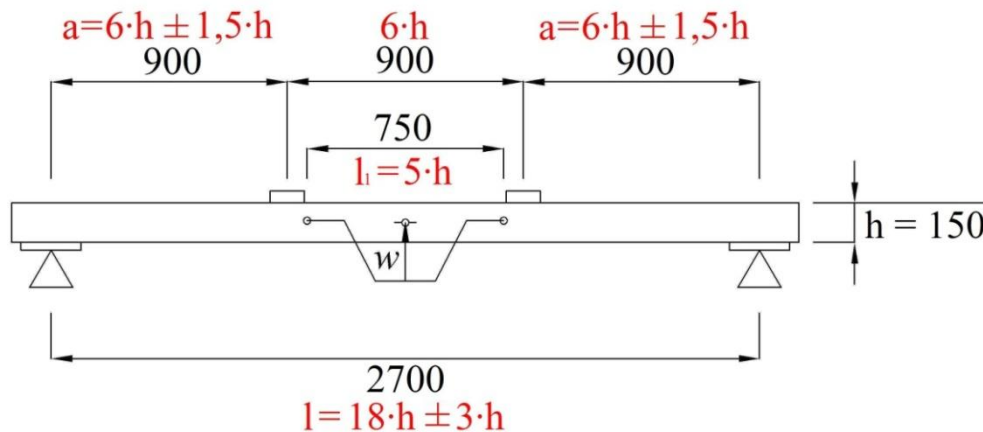


Figura 5.19 Determinación de MOE local. Distancia entre los apoyos.

En la figura 5.19, en rojo aparecen los límites que marca la norma con respecto al módulo de elasticidad local. Dimensiones en mm.

Con la primera probeta a ensayar se realiza un tanteo de la velocidad a la que se aplica la carga, así como la carga máxima para la determinación del módulo de elasticidad. Esta carga no debe superar el 40 % de la fuerza máxima prevista.



Figura 5.20 Detalle de la colocación de los extensómetros

- Modulo de elasticidad global

Se mide la deformación producida en todo el tramo comprendido entre los apoyos extremos, es decir dieciocho veces el canto de la pieza. Este módulo incorpora en su valor el efecto del cortante (Fernández-Golfín, 2003). Para ello, se coloca un extensómetro de 50 mm en el lado traccionado del centro de la luz, quedando en contacto con el canto inferior de la pieza, y registra la deformación que tiene lugar en esta zona de la pieza.

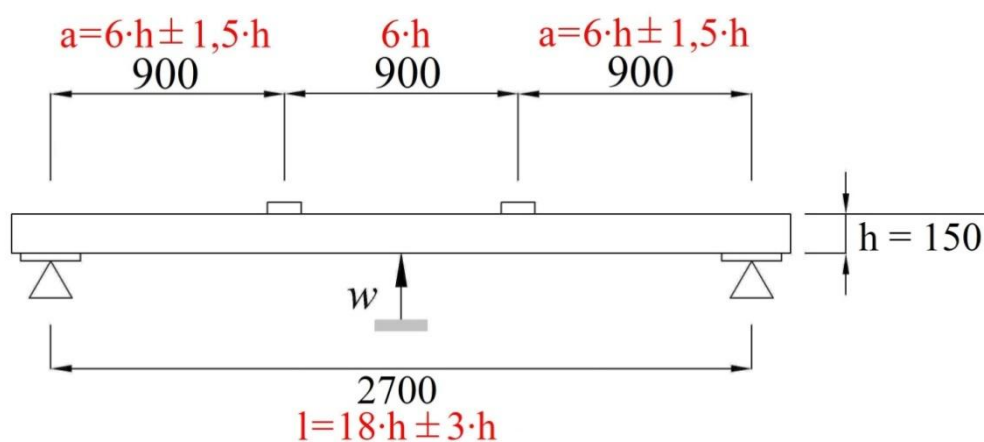


Figura 5.21 Determinación del MOE global. Distancia entre los apoyos, dimensiones en mm



En la figura 5.21, en rojo aparecen los límites que marca la norma con respecto al módulo de elasticidad global. Dimensiones en mm.

El extensómetro obtiene los milímetros que se deforma en función de los kN de carga que se van aplicando de formas progresiva, por lo que se obtiene es la pendiente de la recta que relaciona dichas variables.

El módulo de elasticidad global se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$E_{m,g} = \frac{3 \cdot a \cdot l^2 - 4 \cdot a^3}{2 \cdot b \cdot h^3 \cdot \left(2 \cdot \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6 \cdot a}{5 \cdot G \cdot b \cdot h} \right)}$$

$F_2 - F_1$ es el incremento de carga que se produce en el tramo elástico de una probeta sometida a flexión correspondiente al tramo de línea continuo (figura 5.18)

$w_2 - w_1$ es el incremento de deformación al pasar de una carga F_1 a otra F_2 , en mm.

a es la distancia entre el punto de apoyo y el punto de aplicación de carga más cercano, en mm. ($6 \cdot h \pm 1,5 \cdot h$)

l es la luz en flexión o longitud del vano en el que se miden las deformaciones, en mm.

Si no se conoce G se puede tomar como infinito, no obstante en especies de coníferas se puede tomar como módulo de elasticidad transversal $G = 650 \text{ N/mm}^2$.

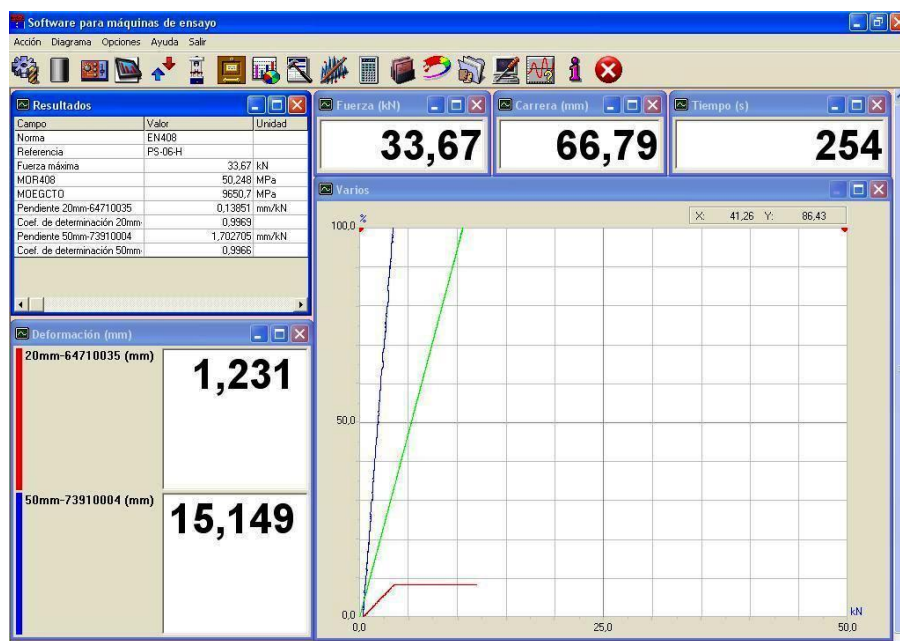


Figura 5.22 Software para el ensayo a flexión

La velocidad de ensayo, es decir, la velocidad con que los apoyos superiores se desplazan se tiene que ajustar y es necesario que se encuentre dentro de la norma. La velocidad de ensayo es de 0,10 kN/s.

Para la determinación de la humedad y de la densidad, se extraen dos rebanadas de la probeta, de 15 cm de longitud, lo más cerca posible de la sección central. Estas rebanadas han de ser de sección completa, a ser posible libres de nudos y bolsas de resina.



6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1 Contenido de humedad

El contenido de humedad de las probetas es estimado a partir de los diferentes procedimientos descritos, disminuyendo, como cabe esperar, el valor de dicha variable a medida que transcurre el tiempo.

En la figura 6.1 se muestra la evolución, de manera similar, que tiene lugar el contenido de humedad de las probetas medido con los diferentes procedimientos a lo largo del proceso de secado de las mismas.

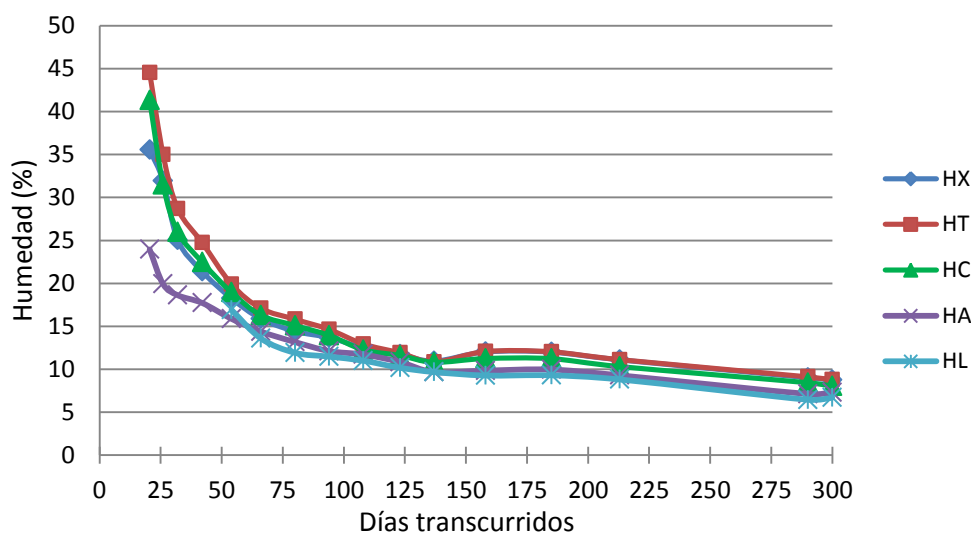


Figura 6.1 Evolución del contenido de humedad de las probetas con el paso del tiempo

El contenido de humedad va descendiendo a lo largo del secado natural de la madera, pero no lo hace de manera uniforme. Al comienzo, la disminución es más rápida y luego se va estabilizando, siendo más difícil la pérdida de humedad de la madera, y llegándose a comportamientos asintóticos, momento en el que la madera alcanza el contenido de humedad de equilibrio.

Por otro lado, cuando el contenido de humedad es alto, y el agua presente en la madera se encuentra por encima del punto de saturación de la fibra, es decir, en estado sobresaturado ($> 30\%$), la variación de contenido de humedad entre las probetas es mucho más grande que cuando el contenido de humedad es menor (figura



6.2). El agua se deposita de forma libre en los huecos de las células, por lo que no presenta ningún tipo de atadura dentro de la célula. Se pueden encontrar zonas con humedad de la madera elevada contiguas a otras de humedad inferior.

Sin embargo, para contenidos de humedad por debajo del punto de saturación de la fibra, la distribución del agua dentro de la madera es totalmente uniforme o, existe un gradiente en el que la distribución del agua se da con cierta regularidad.

Es por ello que, al comienzo del proceso de secado, la variable se comporta de manera más inestable y que las lecturas del xilohigrómetro son más imprecisas.

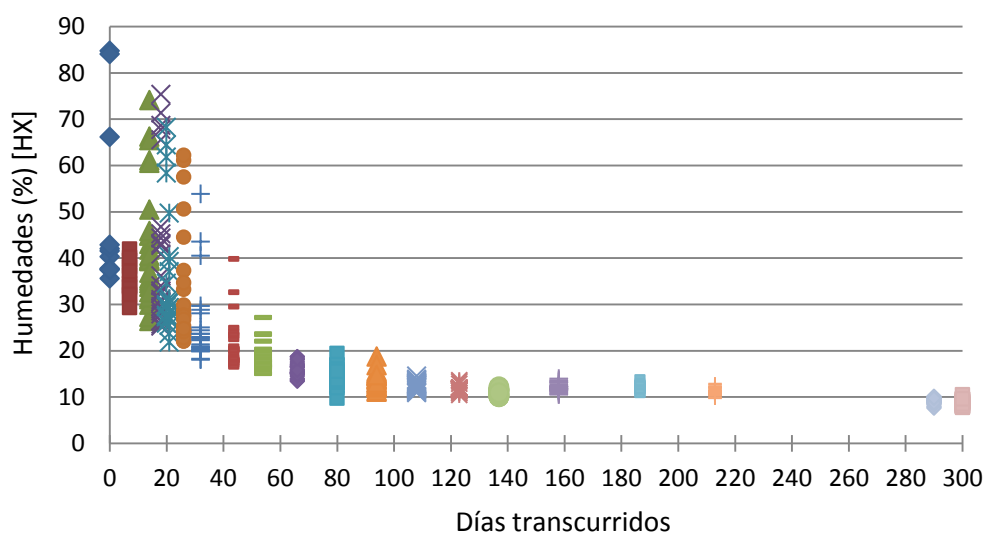


Figura 6.2 Medidas de contenido de humedad (HX) de las 26 probetas en todos los días de medición

Por ello, se procede a estudiar el contenido de humedad en tres momentos diferentes.

Con la madera próxima al punto de saturación de la fibra, cuando han transcurrido 26 días de secado, la variación que se da entre los valores de las probetas es relativamente alta (tabla 6.1).



| $H \approx 30 \%$ | HX | HT | HC | HA |
|-------------------|------|------|------|------|
| Desv. típica | 12,5 | 12,0 | 9,4 | 0,3 |
| Valor medio | 31,9 | 35,0 | 31,5 | 19,9 |
| CV (%) | 39,2 | 34,4 | 29,7 | 1,7 |

Tabla 6.1 Desviación típica, valor medio y coeficiente de variación del contenido de humedad en cada procedimiento, próximos al punto de saturación de la fibra

Por medio del análisis de la varianza se comparan los valores medios de los diferentes grupos o factores de una misma variable. No obstante, en el anexo D se realiza un análisis de la varianza más detallado.

De esta manera, la variable es el contenido de humedad de las probetas y el factor es el procedimiento utilizado para su medida, es decir, los distintos tipos de electrodos utilizados.

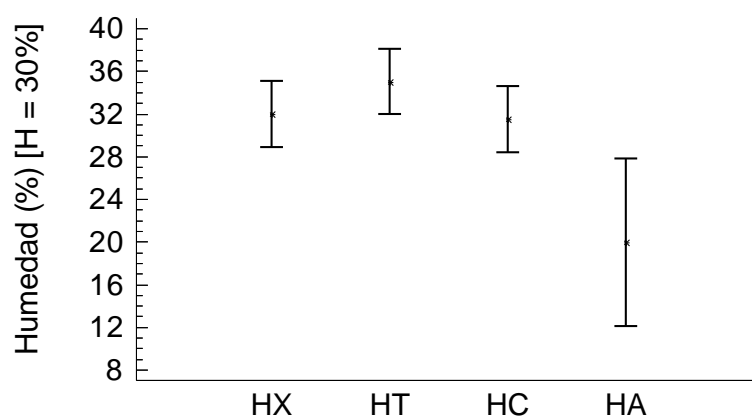


Figura 6.3 Gráfico de medias del análisis de la varianza para la variable contenido de humedad en valores próximos a la de saturación de la fibra

La figura 6.3 muestra que no hay diferencia estadísticamente significativa entre los valores medios de cada procedimiento de medida, para un 95,0%.

Si la madera continúa secándose, llega un momento en que, transcurridos 54 días, alcanza contenidos de humedad inferiores al 20 %, por lo que deja de considerarse madera verde. De la misma manera

| H \approx 20 % | HX | HT | HC | HA | HL |
|------------------|------|------|------|------|------|
| Desv. típica | 2,9 | 3,6 | 3,8 | 0,9 | 1,7 |
| Valor medio | 18,3 | 19,9 | 19,0 | 15,9 | 16,9 |
| CV (%) | 16,1 | 18,3 | 19,9 | 5,5 | 10,1 |

Tabla 6.2 Desviación típica, valor medio y coeficiente de variación del contenido de humedad en cada procedimiento, próximos al 20 % de contenido de humedad

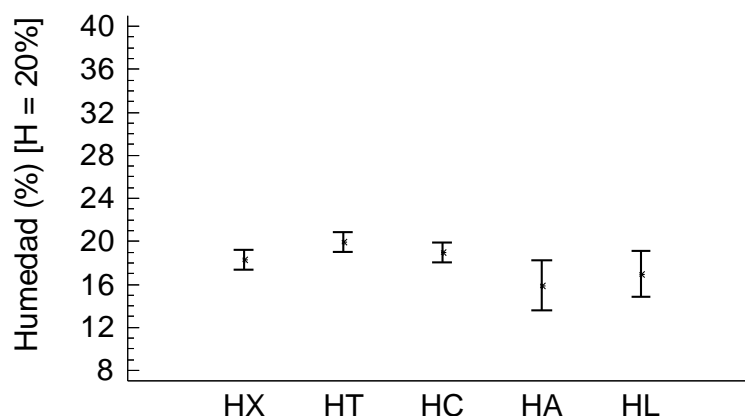


Figura 6.4 Gráfico de medias del análisis de la varianza para la variable contenido de humedad en valores próximos al 20%, con sus intervalos de confianza

Al igual que en caso anterior, no hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias en función del procedimiento, para un 95,0% de nivel de confianza.

Cuando las probetas han alcanzado el 12% de contenido de humedad, a los 158 días, los coeficientes de variación asociados a dicha variable son menores (tabla 6.3) ya que, como se observa en la figura 6.2, en esta fase del proceso de secado la variación entre las medidas es muy pequeña.

| H \approx 12 % | HX | HT | HC | HA | HL |
|------------------|------|------|------|-----|-----|
| Desv. típica | 0,9 | 0,9 | 1,0 | 0,6 | 0,7 |
| Valor medio | 12,0 | 12,1 | 11,3 | 9,9 | 9,3 |
| CV (%) | 7,3 | 7,7 | 9,0 | 6,0 | 8,0 |

Tabla 6.3 Desviación típica, valor medio y coeficiente de variación del contenido de humedad en cada procedimiento, próximos al 12 % de contenido de humedad

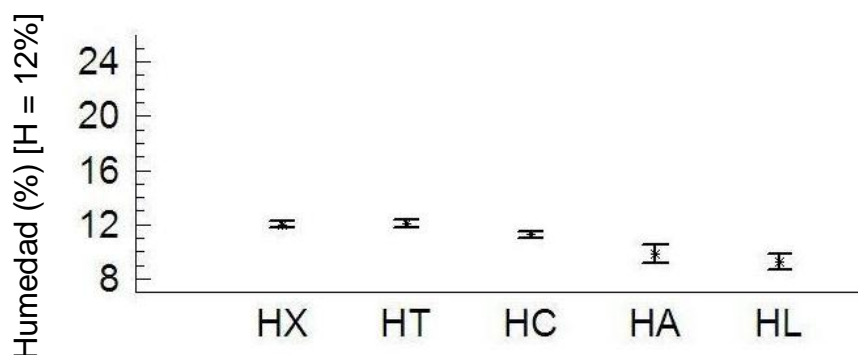


Figura 6.5 Gráfico de medias del análisis de la varianza para la variable contenido de humedad en valores próximos al 12%, con sus intervalos de confianza

Al realizar el análisis de la varianza y comparar los valores medios se observa que hay diferencia significativa entre las medias del contenido de humedad según el equipo utilizado, para un nivel de confianza del 95,0% (figura 6.5).

Se aprecia que los tirafondos (HT) dan valores ligeramente superiores a otros electrodos sin aislar; sin embargo las diferencias son mucho más marcadas entre el procedimiento que utiliza como electrodos puntas aisladas y el que utiliza clavos sin aislar.

Los valores de contenido de humedad obtenidos mediante puntas aisladas deberían ser próximos a los obtenidos mediante otros procedimientos. No obstante, debido a que éstos, por el recubrimiento de material aislante, miden la humedad exactamente a la profundidad indicada, que corresponde con la máxima profundidad, los valores de humedad debería ser algo ser más altos. Sin embargo, con clavos y tirafondos, a pesar de que se clavan a la misma profundidad, no se sabe exactamente que humedad se esta midiendo, ya que es conductor todo su cuerpo. La profundidad a la que miden el contenido de humedad las puntas aisladas puede que sea mayor que en el caso de los otros electrodos (apartado 5.2.4).

Por ello, en un principio, el procedimiento más habitual para la medida del contenido de humedad es xilohigrómetro con martillo (HX), ya que, en éste caso, es el que menor coeficiente de variación presenta en el tramo de humedad comprendido entre el 20% y el 12%.



Por otro lado, con los valores de contenido de humedad de todas las probetas se analizan entre si los procedimientos de medida y se obtienen altos coeficientes de correlación entre los procedimientos (tabla 6.4).

| | HX | HT | HC | HA | HL |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|
| HX | 1,000 | | | | |
| HT | 0,924 | 1,000 | | | |
| HC | 0,914 | 0,955 | 1,000 | | |
| HA | 0,842 | 0,882 | 0,915 | 1,000 | |
| HL | 0,879 | 0,854 | 0,881 | 0,932 | 1,000 |

Tabla 6.4 Matriz de coeficientes de correlación para los diferentes procedimientos de medida de la humedad

6.2 Clasificación visual

La clasificación visual de las probetas se realiza en tres momentos diferentes a lo largo del proceso de secado, siguiendo la norma española de clasificación visual UNE 56544 para gran escuadría ($b > 70$ cm). De esta manera se determina las piezas que se encuentran dentro de los límites que marca la norma y, por lo tanto, pertenecen a la calidad visual MEG y las que no cumplen y son piezas de rechazo (tabla 6.5).

Inicialmente, el rechazo de las piezas se debe a singularidades o defectos propios de la madera aserrada tales como presencia de nudos de dimensiones no tolerables, entrecasco y gemas.

Sin embargo, a medida que transcurre el proceso de secado, tiene lugar una merma en las dimensiones de las probetas, apareciendo tensiones internas en la madera y, con ello, otras singularidades relacionadas con el secado de ésta, como alabeos y curvaturas, ocasionando que el número de probetas de rechazo sea mayor (figura 6.6).

| Días transcurridos | Humedad (%) [HX] | Calidad | | | |
|--------------------|---------------------|---------|------|---------|------|
| | | MEG | | Rechazo | |
| | | nº | % | nº | % |
| 14 | 42,8 | 20 | 76,9 | 6 | 23,1 |
| 80 | 15,9 | 19 | 73,1 | 7 | 26,9 |
| 185 | 12,0 | 10 | 38,5 | 16 | 61,5 |
| 300 | 8,8 | 10 | 38,5 | 16 | 61,5 |

Tabla 6.5 Números y porcentaje de piezas rechazadas según la norma de clasificación visual

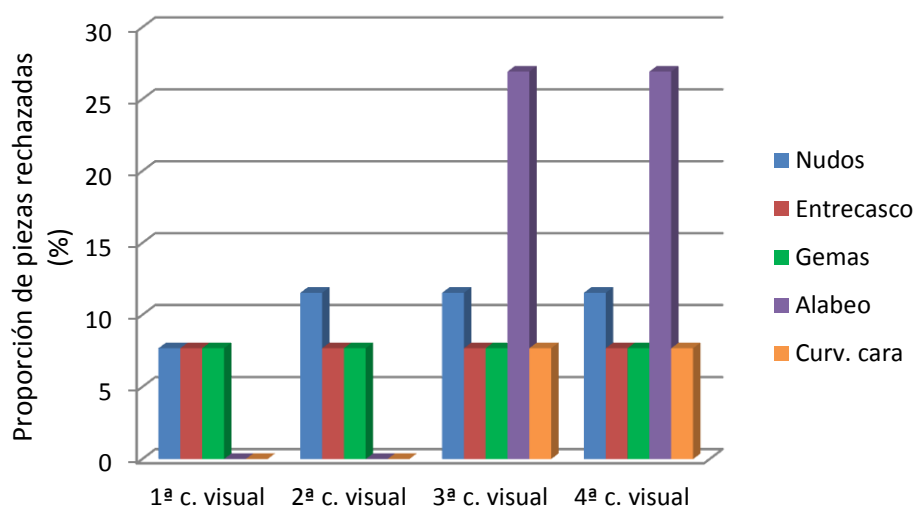


Figura 6.6 Proporción de piezas rechazadas por causa en cada clasificación visual

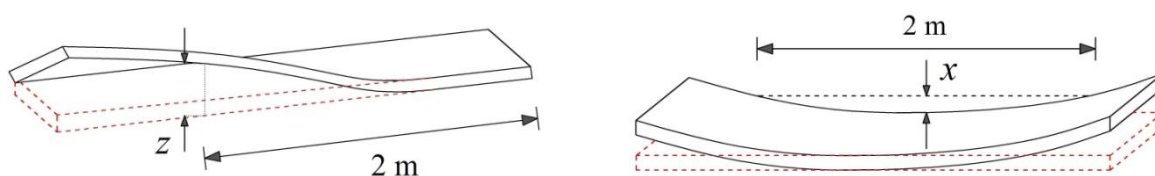


Figura 6.7 Defectos que aparecen a medida que las probetas pierden contenido de humedad. Alabeo (izquierda) y curvatura en cara (derecha)



6.3 Merma

La variación del contenido de humedad en la madera ocasiona, a su vez, una variación en las dimensiones de ésta. Con el paso del tiempo, a medida que avanza el proceso de secado de las probetas, el contenido de humedad de la madera va descendiendo y, ello supone una reducción de las dimensiones de las probetas.

Como se ha comentado en el apartado anterior, la clasificación visual de las probetas se realiza en tres ocasiones diferentes, por lo que la medida de las dimensiones de las probetas ha tenido lugar en los mismos momentos. Con carácter previo a realizar el ensayo a flexión, una vez que la madera alcanza la humedad de equilibrio, se realiza una cuarta medición de las dimensiones de las probetas.

| Días transcurridos | H (%) [HX] | Cara (mm) | Canto (mm) |
|--------------------|------------|-----------|------------|
| 14 | 42,8 | 144,3 | 95,1 |
| 80 | 14,4 | 141,2 | 92,8 |
| 185 | 12,0 | 139,1 | 91,6 |
| 300 | 8,8 | 138,5 | 91,3 |

| | | |
|----------------|-------|-------|
| % merma / % MC | 0,118 | 0,117 |
|----------------|-------|-------|

Tabla 6.6 Reducción en las dimensiones de cara y canto durante el proceso de secado

Se comprueba que las dimensiones de las probetas, tanto en canto como en cara, se ven reducidas con el paso del tiempo, y siguen un comportamiento lineal. A medida que tiene lugar el secado de las probetas, se produce una merma en sus dimensiones para contenidos de humedad que van desde 42,8% hasta 8,8 % (figura 6.8).

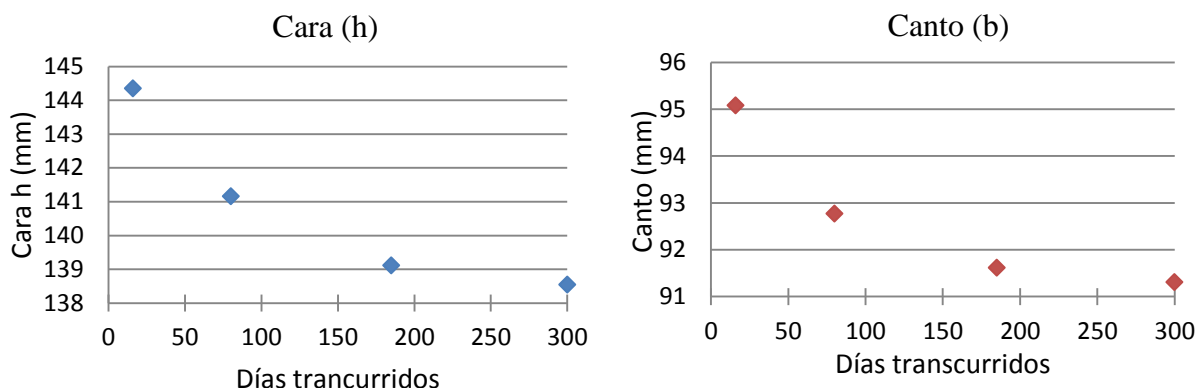


Figura 6.8 Merma producida en la cara (izquierda) y el canto (derecha) de las probetas durante el proceso de secado

Teniendo en cuenta lo anterior, queda reflejado que, durante el proceso de secado de las probetas, tiene lugar una merma en la cara de 5,8 mm sobre 144,3 mm de dimensión inicial media y en el canto de 3,8 mm sobre 95,1 mm. Es decir que, tanto en un caso como en otro, se produce una reducción del 4 % de la dimensión.

La merma que tiene lugar es de 0,12% por cada 1% de disminución del contenido de humedad (tabla 6.6).

Por otro lado, una disminución en las dimensiones y en el contenido de humedad de las probetas durante el proceso de secado, conlleva una pérdida de peso (figura 6.9). El peso de las probetas se obtiene a través de la balanza del equipo Portable Lumber Grader.

Al igual que sucede con el contenido de humedad, al comienzo se produce una pérdida de peso relativamente brusca, equivalente a la liberación del agua libre presente en la madera a la atmósfera, para luego después disminuir más lentamente, siendo el agua de impregnación el que se libera.

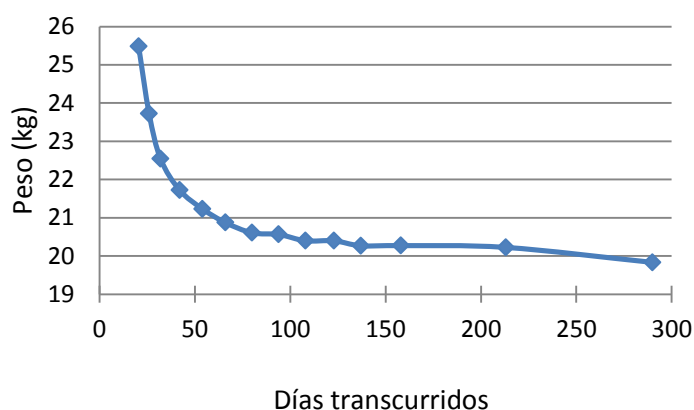


Figura 6.9 Evolución del peso medio de las probetas a lo largo de su secado

Por ello, la masa de las probetas y su contenido de humedad presenta una relación fuerte, ya que la mayor parte del peso de las probetas se debe a la presencia en mayor o menor medida de agua.

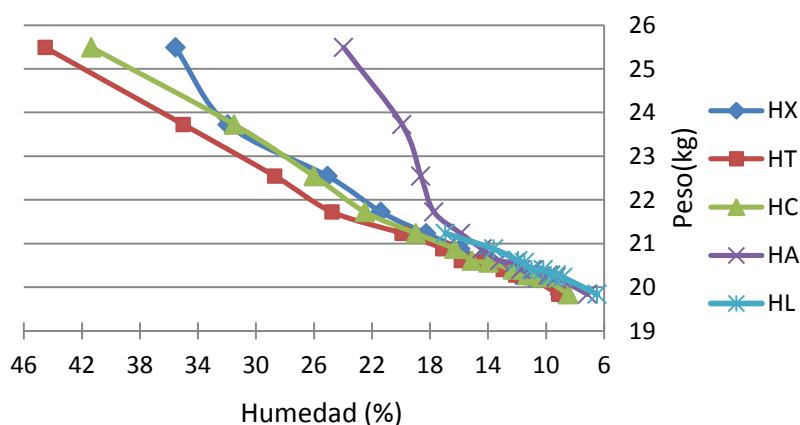


Figura 6.10 Relación lineal entre el contenido de humedad y el peso de las probetas

De la misma manera, conociendo las dimensiones de las probetas, a partir de la clasificación visual, se puede conocer su volumen y, por lo tanto, su densidad:

$$\rho = \frac{M}{V}$$

Siendo

ρ la densidad de la probetas, en kg/m^3 .



M la masa de las probetas obtenida mediante PLG, en kg

V el volumen de las probetas conocido a partir de las clasificaciones visuales, en m³

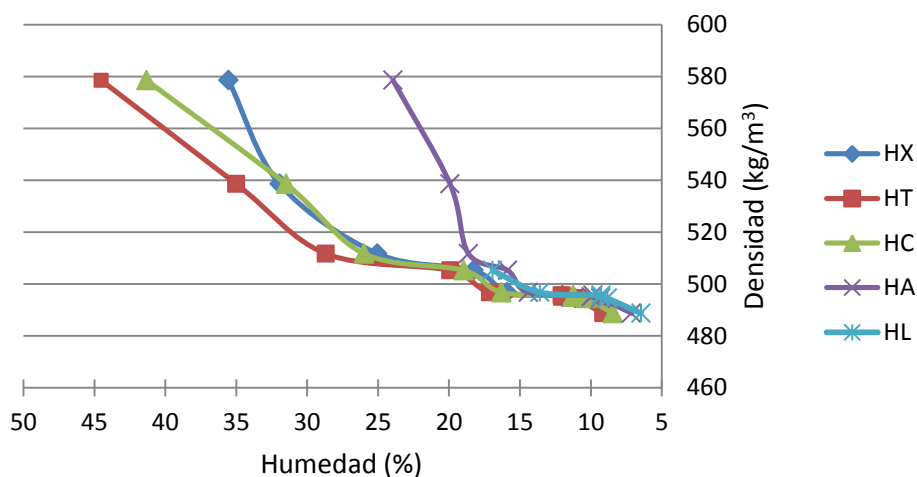


Figura 6.11 Relación lineal entre el contenido de humedad y la densidad de las probetas

6.4 Velocidad de propagación

6.4.1 Evolución de la velocidad de propagación con el contenido de humedad

La velocidad de propagación de las ondas, tanto acústicas como de vibración, aumenta a medida que transcurre el proceso de secado de la madera. Esto refleja que contenidos de humedad altos dificultan la propagación de las ondas y, por ello, su velocidad es menor.

En la figura 6.12 se observa el aumento que tiene lugar en la velocidad de propagación con el paso del tiempo. No obstante, al comienzo dicho aumento es más notable y posteriormente se produce de forma más lenta.

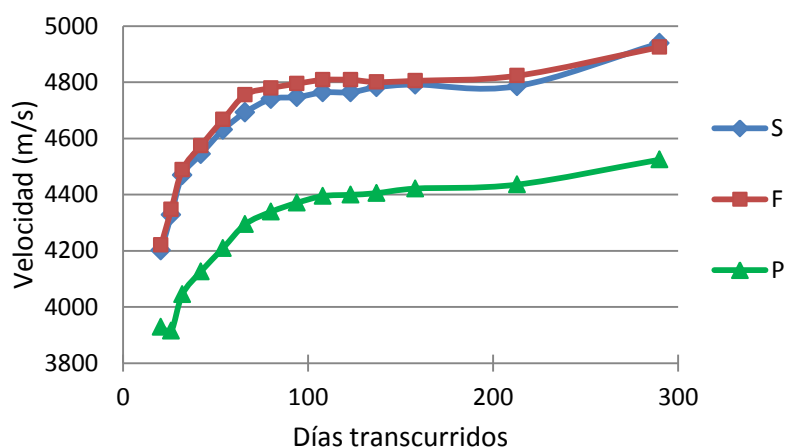


Figura 6.12 Evolución de las medias de la variable velocidad de propagación o vibración a lo largo del proceso de secado

Al igual que sucede con el contenido de humedad, la variación de velocidad no se produce de la misma manera a lo largo del secado natural de las probetas; por ello, se analiza la variable en tres momentos diferentes.

Por un lado, cuando la madera ha disminuido su contenido de humedad hasta alcanzar el punto de saturación de la fibra, a los 26 días transcurridos desde su selección en aserradero, se tiene:

| H \approx 30 % | S | F | P |
|------------------|------|------|------|
| Desv. típica | 284 | 271 | 280 |
| Media | 4328 | 4347 | 3915 |
| CV (%) | 6,6 | 6,2 | 7,1 |

Tabla 6.7 Desviación típica, valor medio y coeficiente de variación de la velocidad según cada equipo, en humedades próximas al punto de saturación de la fibra

Se realiza un análisis de la varianza en donde la variable a estudiar es la velocidad de propagación de las probetas y el factor son los equipos utilizados para su medida.

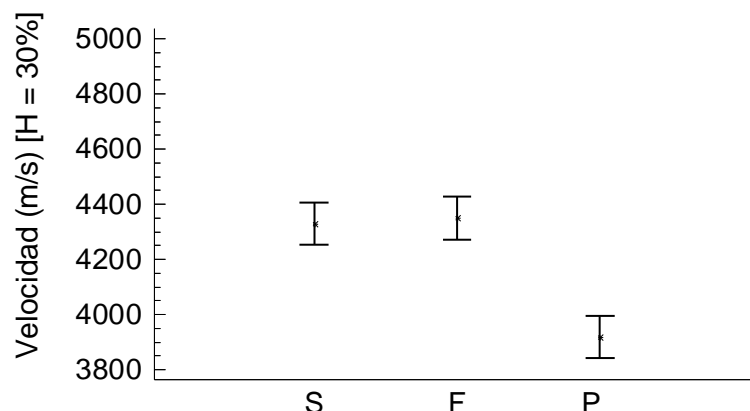


Figura 6.13 Gráfico de medias del análisis de la varianza de la velocidad de propagación en valores próximos a la de saturación de la fibra

En la figura 6.13 se observa que hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias de la variable para equipo utilizado, para un nivel de confianza del 95,0%.

Si la madera continúa secándose llega un momento que toma valores en torno al 20% de contenido de humedad (54 días transcurridos).

| H \approx 20 % | S | F | P |
|------------------|------|------|------|
| Desv. típica | 196 | 180 | 226 |
| Media | 4631 | 4667 | 4210 |
| CV (%) | 4,2 | 3,9 | 5,4 |

Tabla 6.8 Desviación típica, valor medio y coeficiente de variación de la velocidad de propagación según cada equipo, en humedades próximas al 20%

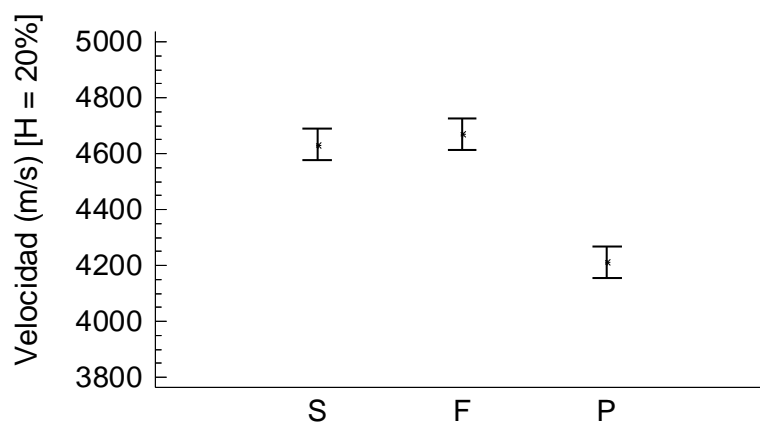


Figura 6.14 Gráfico de medias del análisis de la varianza para la velocidad de propagación en valores próximos al 20%



El análisis de la varianza refleja la existencia de diferencia significativa entre la velocidad de propagación en función del equipo con el que se mida, para un nivel de confianza del 95,0%.

Con valores de contenido de humedad en torno al 12 %, (158 días) el coeficiente de variación de la velocidad de propagación en los tres equipos es similar al obtenido a los anteriores.

| H \approx 12 % | S | F | P |
|------------------|------|------|------|
| Desv. típica | 201 | 188 | 214 |
| Media | 4791 | 4805 | 4421 |
| CV (%) | 4,2 | 3,9 | 4,8 |

Tabla 6.9 Desviación típica, valor medio y coeficiente de variación de la velocidad de propagación según cada equipo, en humedades próximas al 12 %

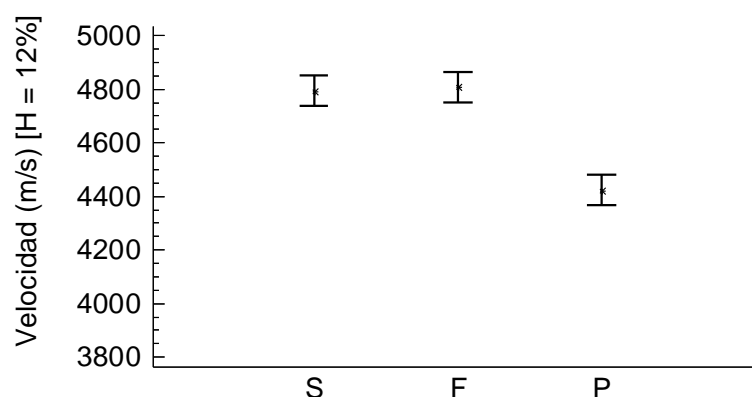


Figura 6.15 Gráfico de medias del análisis de la varianza para la velocidad de propagación en valores próximos al 12%

De la misma manera que en los casos anteriores, se aprecia diferencia significativa entre las velocidades de propagación de acuerdo con el equipo utilizado, para un nivel de confianza del 95,0%

Se observa que en los equipos que miden la velocidad de propagación por métodos acústicos, es decir Sylvatest Trio y Microsecond Timer, no existe diferencia significativa entre las medias.



Sin embargo en el caso del equipo de análisis vibración (PLG), la velocidad de propagación da valores menores, del orden de 400 m/s aproximadamente. Este hecho es el que hace que si que existan diferencias significativas.

Analizando los valores de velocidad de propagación de todas las probetas según cada equipo se obtienen unos coeficientes de correlación altos (tabla 6.10).

| | S | F | P |
|---|-------|-------|-------|
| S | 1,000 | | |
| F | 0,996 | 1,000 | |
| P | 0,980 | 0,978 | 1,000 |

Tabla 6.10 Matriz de coeficientes de correlación para los diferentes equipos de medida de velocidad

Se analiza la evolución de velocidad de propagación de las ondas con respecto al contenido de volumen de las probetas y se comprueba el tipo de relación existente entre ambas. Concretamente se estudia la variación en el contenido de humedad de las probetas mediante los cinco procedimientos de medida con respecto a la velocidad de propagación medida en función de los tres equipos utilizados.

En el caso de utilizar el xilohigrómetro, haciendo uso del martillo, para medir el contenido de humedad, se comprueba que ambas variables presentan una relación fuerte en los tres equipos de medida de la velocidad de propagación (figura 6.16).

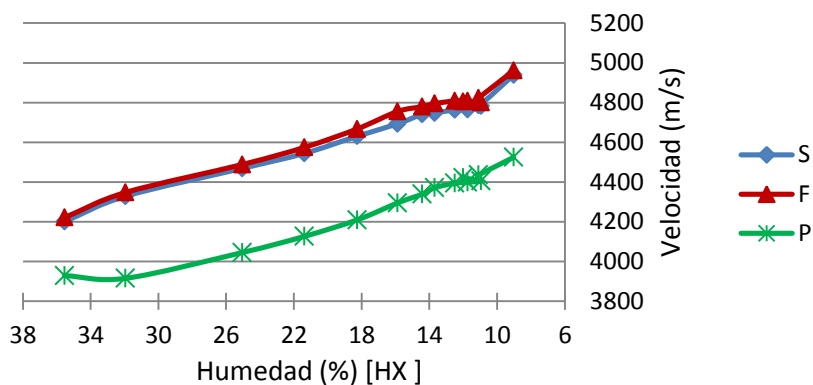


Figura 6.16 Relación entre el contenido de humedad (HX) y la velocidad de propagación

Resultados similares se obtienen al hacer uso del xilohigrómetro con los electrodos previamente clavados en la madera.

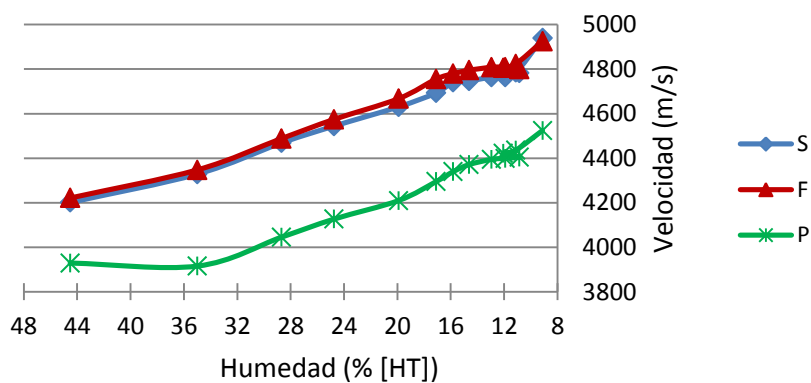


Figura 6.17 Relación entre el contenido de humedad (HT) y la velocidad de propagación

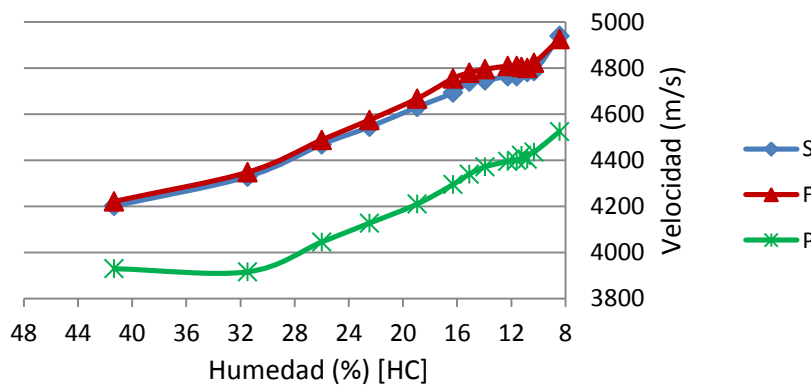


Figura 6.18 Relación entre el contenido de humedad (HC) y la velocidad de propagación

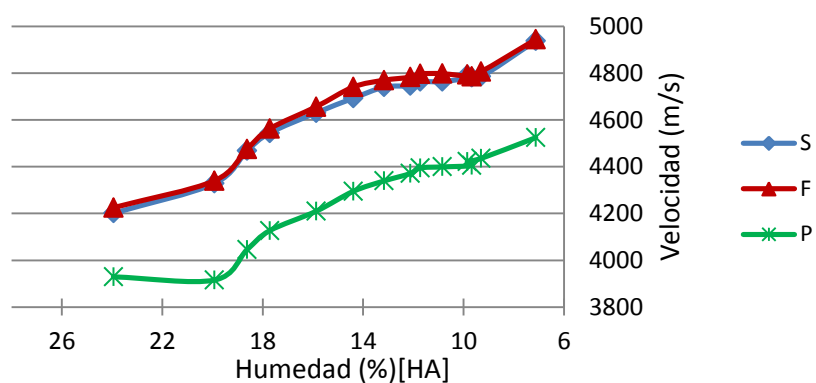


Figura 6.19 Relación entre el contenido de humedad (HA) y la velocidad de propagación

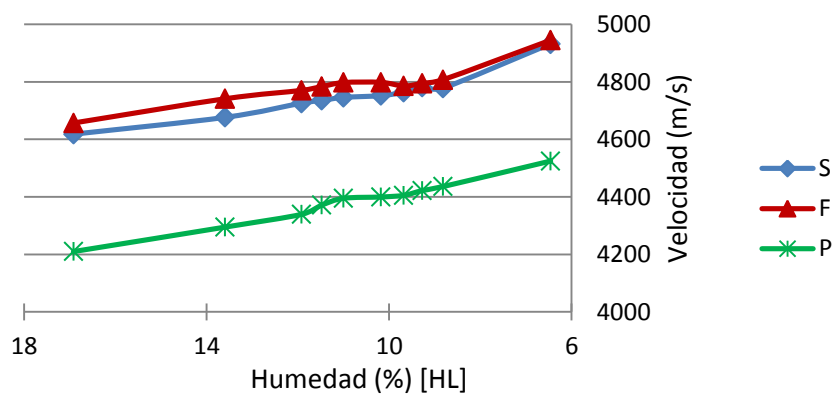


Figura 6.20 Relación entre el contenido de humedad (HL) y la velocidad de propagación

Relacionando todas las variables que determinan el contenido de humedad con las que obtienen la velocidad de propagación de la onda se obtienen relaciones lineales altas, con altos coeficientes de correlación, superiores todos ellos a 0,85 (Tabla 6.11).

Para la ecuación de relación lineal del tipo $Y = a \cdot X + b$, se tiene los siguientes coeficientes:



| Y (velocidad de propagación) | a | X (contenido de humedad) | b | R ² |
|------------------------------------|---------|--------------------------------|--------|----------------|
| S | -24,443 | HX | 5080,1 | 0,981 |
| F | -25,035 | HX | 5123,7 | 0,982 |
| P | -23,385 | HX | 4679,0 | 0,963 |
| S | -18,943 | HT | 5016,6 | 0,975 |
| F | -19,498 | HT | 5061,2 | 0,981 |
| P | -18,053 | HT | 4618,4 | 0,935 |
| S | -21,179 | HC | 5034,3 | 0,975 |
| F | -21,595 | HC | 5073,7 | 0,974 |
| P | -19,933 | HC | 4628,6 | 0,926 |
| S | -41,271 | HA | 5228,5 | 0,949 |
| F | -41,621 | HA | 5265,3 | 0,928 |
| P | -39,828 | HA | 4825,1 | 0,947 |
| S | -26,073 | HL | 5048,8 | 0,892 |
| F | -22,900 | HL | 5049,9 | 0,862 |
| P | -29,505 | HL | 4702,1 | 0,985 |

Tabla 6.11 Relación lineal entre el contenido de humedad determinado a partir de diferentes procedimientos y la velocidad de propagación de los tres equipos

En el caso del xilohigrómetro con martillo (HX), los coeficientes de correlación entre contenido de humedad y velocidad de propagación son ligeramente superiores al resto.

6.4.2 Relación de la velocidad para dos contenidos de humedad diferentes

Se observa que la velocidad medida con los equipos de ultrasonidos y de análisis de vibración, para dos contenidos de humedad diferentes, presenta relación lineal (figuras 6.21, 6.22 y 6.23).

Comparando las velocidades de propagación de onda a través de las 26 piezas para contenidos de humedad de 21,4% y 11,8%, en cada uno de los equipos utilizados se observa que existe un coeficiente k que marca la disminución de la velocidad al incrementar un 1% de contenido de humedad. Dicho coeficiente se deduce de la siguiente manera:

Para Sylvatest se tiene:

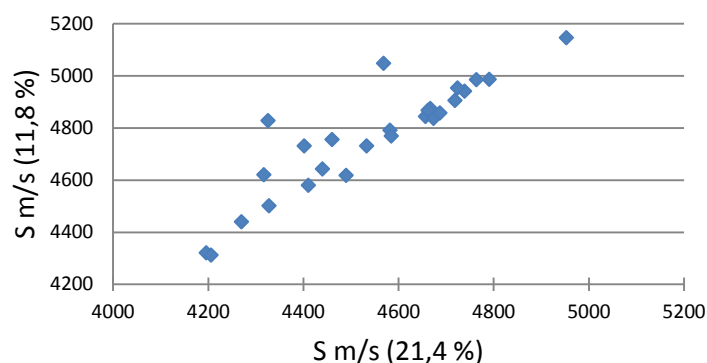


Figura 6.21 Relación lineal entre la velocidad de propagación para dos contenidos de humedad diferentes (Sylvatest)

$$[S(11,8\%)] = 0,9647 \cdot [S(21,4\%)] + 380,6 ; R^2 = 0,805$$

| | Velocidad S 11,8% (m/s) | Velocidad S 21,4% (m/s) | $\frac{m/s}{\% MC}$ | $\frac{\% m/s}{\% MC}$ |
|--------|----------------------------|----------------------------|---------------------|------------------------|
| Maximo | 5145 | 4953 | -20,04 | - 0,4 |
| Mínimo | 4439 | 4270 | -17,60 | -0,4 |

Tabla 6.12 % de velocidad que disminuye por cada % de MC que aumenta (Sylvatest)

De esta manera, existe un valor constante $k = 0,4$, según el cual la velocidad de propagación de la onda a través de la probeta disminuye un 0,4% por cada % de aumento del contenido de humedad, para un intervalo de humedad comprendido entre el 11,8 y el 21,4%.

De manera análoga, para Microsecond Timer se tiene:

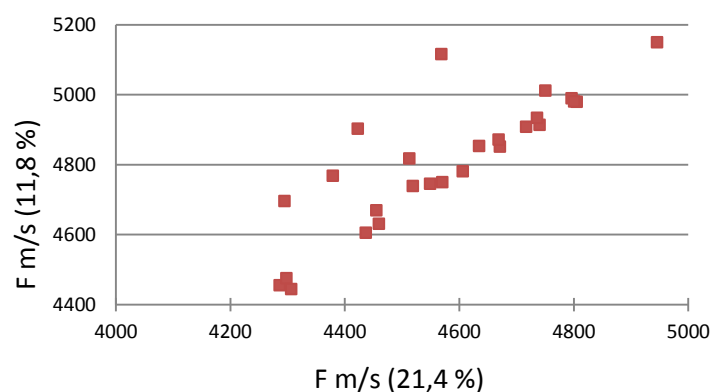


Figura 6.22 Relación lineal entre la velocidad de propagación para dos contenidos de humedad diferentes (MST)

$$[F(11,8\%)] = 0,8649 \cdot [F(21,4\%)] + 851,83 ; R^2 = 0,713$$

| | Velocidad F 11,8% (m/s) | Velocidad F 21,4% (m/s) | $\frac{m/s}{\% MC}$ | $\frac{\% m/s}{\% MC}$ |
|--------|----------------------------|----------------------------|---------------------|------------------------|
| Maximo | 5149 | 4946 | -21,18 | - 0,4 |
| Mínimo | 4604 | 4437 | -17,37 | -0,4 |

Tabla 6.13 % de velocidad que disminuye por cada % de MC que aumenta (MST)

De la misma forma, existe una constante $k = 0,4$, según la cual la velocidad disminuye un 0,4% por cada % que aumenta el contenido de humedad, para un intervalo de humedad comprendido entre el 11,8 y el 21,4%.

Esta constante permite conocer el la velocidad con la que una onda se propaga por una probeta con un determinado contenido de humedad a partir del conocimiento la velocidad de propagación en otro momento, con otro contenido de humedad, para valores de humedad comprendidos entre los reflejados.

Y para el equipo de análisis de las vibraciones:

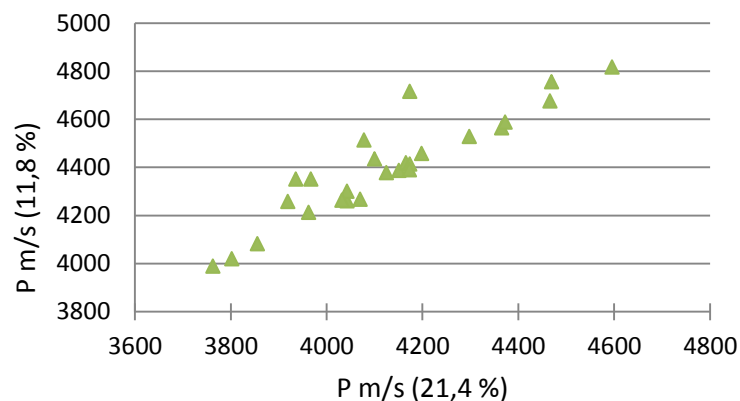


Figura 6.23 Relación lineal entre la velocidad de propagación para dos contenidos de humedad diferentes (PLG)

$$[P(11,8\%)] = 0,9289 \cdot [P(21,4\%)] + 566,11 ; R^2 = 0,841$$

| | Velocidad P 11,8% (m/s) | Velocidad P 21,4% (m/s) | $\frac{m/s}{\% MC}$ | $\frac{\% m/s}{\% MC}$ |
|--------|----------------------------|----------------------------|---------------------|------------------------|
| Maximo | 4817 | 4596 | -23,04 | - 0,5 |
| Mínimo | 3989 | 3763 | -23,61 | -0,6 |

Tabla 6.14 % de velocidad que disminuye por cada % de MC que aumenta (PLG)

De esta manera, para el PLG existe una constante $K = [0,5 - 0,6]$, según la cual la velocidad disminuye un 0,55% por cada % de contenido de humedad.

6.5 Ensayo a flexión frente a técnicas no destructivas

6.5.1 Modulo de elasticidad global

El módulo de elasticidad es un parámetro importante para evaluar el comportamiento y la resistencia de un determinado material al someterlo a una determinada carga. Dicha variable ha sido determinada a partir de diversos procedimientos.

El modulo de elasticidad se ha determinado mediante el ensayo mecánico a flexión de las probetas y también se ha estimado a través de técnicas no destructivas, mediante la velocidad de propagación, haciendo uso de los métodos acústicos y análisis de vibraciones.

| | $E_{m,g}$ (MPa) | E_S (MPa) | E_F (MPa) | E_P (MPa) |
|--------------|-----------------|-------------|-------------|-------------|
| Desv. típica | 1266,2 | 1421,8 | 1366,6 | 1118,3 |
| Valor medio | 9082,1 | 11935,4 | 11999,6 | 8857,7 |
| CV (%) | 13,9 | 11,9 | 11,4 | 12,6 |

Tabla 6.15 Variación existente entre MOE del ensayo a flexión y el MOE estimado mediante técnicas no destructivas

Comparando los distintos módulos de elasticidad obtenidos (figura 6.24) se aprecia que existe una relación lineal moderadamente fuerte entre las variables.

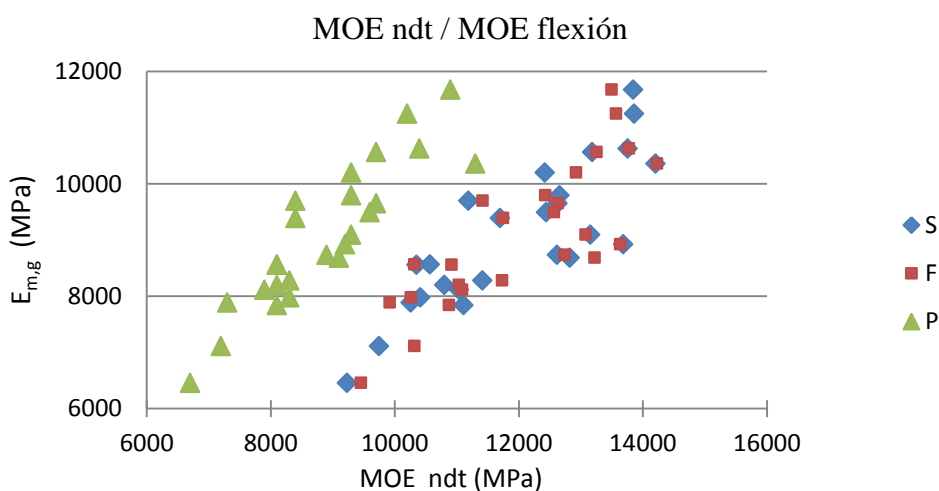


Figura 6.24 Relación entre el MOE del ensayo a flexión y el determinado mediante NDT

De acuerdo con la figura 6.24, se obtienen los siguientes resultados de correlación:

$$\text{Sylvatest: } (E_{m,g}) = 0,738 \cdot (E_S) + 245,31 ; R^2 = 0,708$$

$$\text{MST: } (E_{m,g}) = 0,745 \cdot (E_F) + 116,27 ; R^2 = 0,666$$

$$\text{PLG: } (E_{m,g}) = 1 \cdot (E_P) + 210,21 ; R^2 = 0,809$$

Siendo E_S , E_F y E_P los módulos de elasticidad dinámicos obtenidos a partir de Sylvatest Trio, Microsecond Timer y PLG, respectivamente.

Esta relación indica que la estimación del módulo de elasticidad por parte de las técnicas no destructivas es relativamente buena. En el caso de una estructura puesta en servicio y siempre que los elementos sean accesibles, se pueda determinar esta variable sin necesidad de llevar a cabo un ensayo destructivo de la estructura.

Si se realiza un análisis de la varianza de los valores del módulo de elasticidad obtenidos a través de los diferentes procedimientos (figura 6.25) se aprecia que existen diferencias significativas del MOE según la manera en la que se haya obtenido.

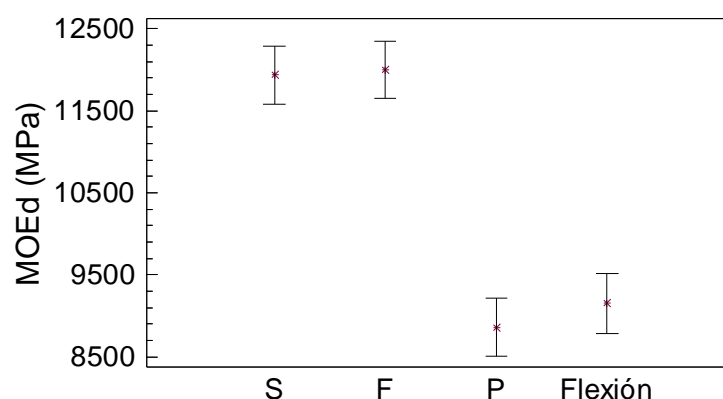


Figura 6.25 Gráfico de medias del análisis de la varianza de la variable MOE, con sus intervalos de confianza



6.5.2 Módulo de elasticidad local frente al módulo de elasticidad global

Comparando los módulos de elasticidad global y local obtenidos mediante el ensayo mecánico a flexión se puede apreciar la figura 6.26.

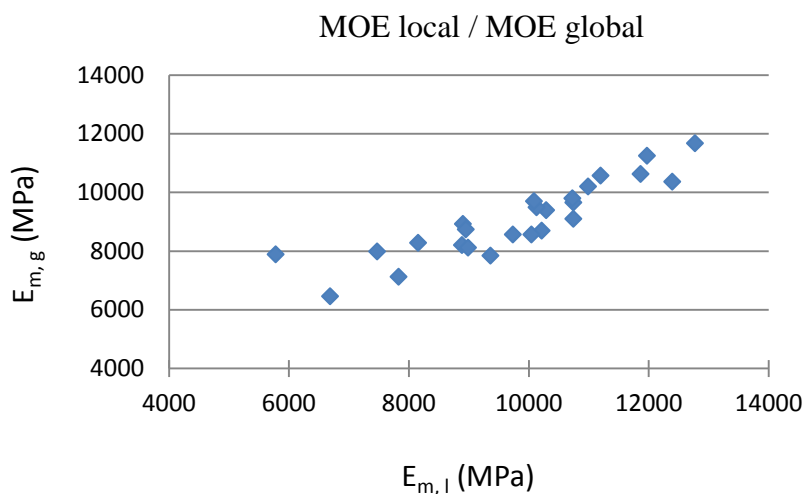


Figura 6.26 Relación lineal entre MOE local y MOE global

$$(E_{m,g}) = 0,6503 \cdot (E_{m,l}) + 2708,5 ; R^2 = 0,795$$

Los resultados indican una buena correlación entre el MOE local y global a la flexión.

| | $E_{m,g}$ (MPa) | $E_{m,l}$ (MPa) |
|--------------|-----------------|-----------------|
| Desv. típica | 1266,2 | 1736,0 |
| Valor medio | 9082,1 | 9800,4 |
| CV (%) | 13,9 | 17,7 |

Tabla 6.16 Variación existente entre MOE global y MOE local

Se deduce de la tabla 6.16 que el $E_{m,l}$ tiene un coeficiente de variación mayor que el $E_{m,g}$.



6.5.3 Resistencia a flexión (MOR)

Se compara el modulo de ruptura MOR o resistencia a flexión de cada probeta con su correspondiente módulo de elasticidad determinado a través de técnicas no destructivas con la finalidad de si dicha resistencia se puede predecir a través de los ensayos no destructivos.

| | MOR (MPa) | E _S (MPa) | E _F (MPa) | E _P (MPa) |
|--------------|-----------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Desv. típica | 15,5 | 1366,6 | 1366,6 | 1118,3 |
| Valor medio | 46,1 | 11935,4 | 11999,6 | 8857,7 |
| CV (%) | 33,5 | 11,5 | 11,4 | 12,6 |

Tabla 6.17 Comparación entre el MOR y el MOE estimado mediante técnicas no destructivas

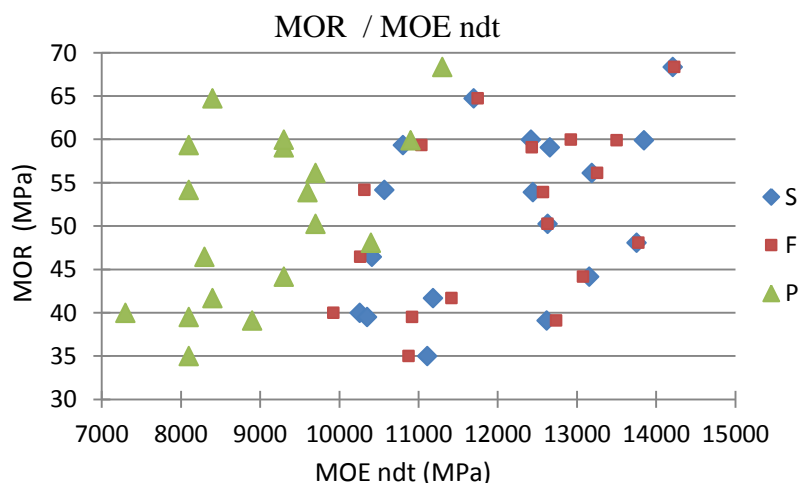


Figura 6.27 Relación entre la resistencia a flexión y el MOE determinado a través de NDT

La figura 6.27 muestra una relación débil entre la resistencia a flexión de las probetas y el MOE determinado a través de técnicas no destructivas. Además los coeficientes de terminación son bajos y, en el caso más favorable (PLG), el MOE con los equipos NDT explica menos de un 30% la variabilidad de la resistencia a flexión.

$$\text{Sylvatest: (MOR)} = 0,0039 \cdot (E_S) - 0,3849 ; R^2 = 0,121$$

$$\text{MST: (MOR)} = 0,0034 \cdot (E_F) + 4,4053 ; R^2 = 0,093$$

$$\text{PLG: (MOR)} = 0,0074 \cdot (E_P) - 20,223 ; R^2 = 0,282$$



Por otro lado MOR frente a MOE global y MOE local se tiene:

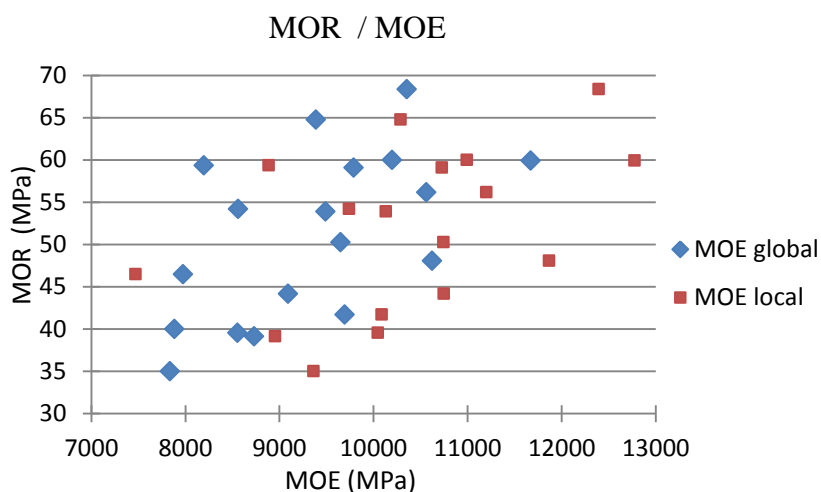


Figura 6.28 Relación la resistencia a flexión y los MOE obtenidos en el ensayo a flexión

$$(MOR) = 0,0083 \cdot (E_{m,g}) - 30,095 ; R^2 = 0,433$$

$$(MOR) = 0,0054 \cdot (E_{m,l}) - 7,5462 ; R^2 = 0,366$$

En general la resistencia a flexión no tiene una buena relación lineal con los diferentes módulos de elasticidad, tanto de técnicas no destructivas como del ensayo a flexión.

Si el uso del MOE es estimar la resistencia correspondiente flexión de una pieza de madera, el MOE global sería la mejor alternativa, aunque solamente explica un 43,3 % la variabilidad de la resistencia a flexión.

6.6 Evolución de las clases resistentes asignadas por PLG

La madera aserrada, para su uso estructural, esta clasificada de forma que queda asignada a una clase resistente. Es este estudio la clase resistente es determinada mediante el equipo de análisis de vibración Portable Lumber Grader que, a partir de

la vibración longitudinal que recorre la probeta, la relaciona con sus propiedades físicas y mecánicas, asignando una clase resistente a la probeta ensayada.

De esta manera, en la tabla 6.18 se refleja el número de vigas que pertenece a cada clase resistente.

| | OUT | C14 | C16 | C18 | C22 |
|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| Inicio (H≈30%) | 7 | 6 | 4 | 8 | 1 |
| Medio (H≈20%) | 9 | 5 | 8 | 3 | 1 |
| Final (H≈12%) | 9 | 8 | 7 | 1 | 1 |

Tabla 6.18 Número de piezas pertenecientes a cada clase resistente en tres momentos del proceso de secado

Expresado gráficamente se tiene:

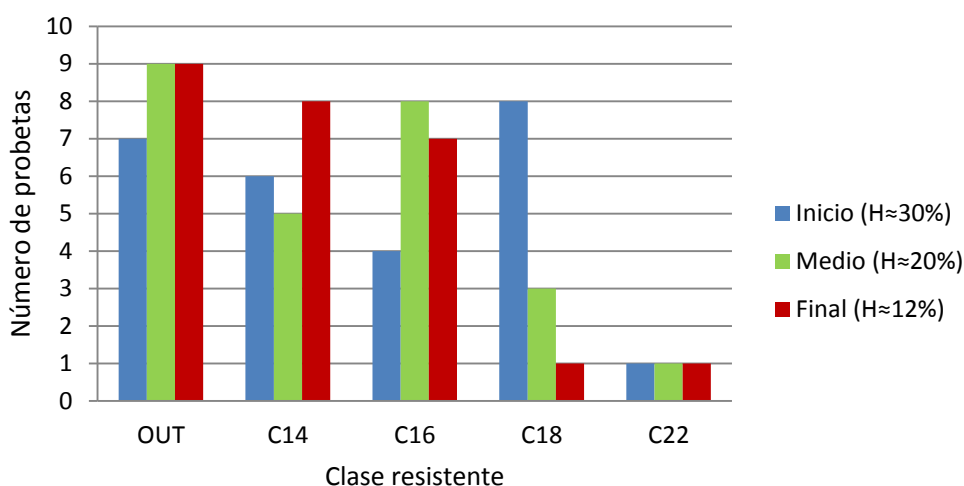


Figura 6.29 Número de probetas pertenecientes a cada clase resistente en tres momentos del proceso de secado

Gran cantidad de las probetas ensayadas que, en los primeros momentos del proceso de secado, pertenecen a la clase resistente C18 pasan, a medida que pierden humedad, a clases resistentes inferiores como C16 y C14. De la misma manera, probetas pertenecientes a la clase resistente C14 pasan a estar fuera de clasificación, y algunas C16 también, previo paso por C14.



El valor de la clase resistente de una pieza representa su resistencia característica a flexión, en N/mm^2 . Por ello, se deduce que a medida que disminuye el contenido de humedad de las probetas, éstas van perdiendo resistencia frente a esfuerzos de flexión, al pasar a formar parte de clases resistentes inferiores.



7. CONCLUSIONES

- En teoría, el contenido de humedad de las probetas se mediría de manera más exacta mediante el empleo de electrodos de puntas aisladas, ya que este tipo de electrodos mide el contenido de humedad a la profundidad que indica la norma. No obstante, los valores obtenidos con otros tipos de electrodos, cuya profundidad de medida no es tan clara, son mayores que los de puntas aisladas, por lo que este hecho no parece adecuarse a la teoría.
- Con respecto a la clasificación visual de las probetas, a medida que avanza el proceso de secado natural de éstas, se produce un aumento en el número de rechazos, ya que a medida que pierden humedad aparecen singularidades propias de la madera seca, sobre todo alabeos y curvaturas. Al comienzo del proceso un 23,1% son probetas de rechazo, mientras que al final del mismo el rechazo aumenta a un 61,5%. Por ello, los parámetros que permiten predecir deformaciones en madera verde de gran escuadría (anchura máxima del anillo y presencia de médula) no discriminan las piezas que luego serán rechazo en seco.
- Con el paso del tiempo, como consecuencia de la disminución del contenido de humedad de las probetas, se produce una merma o reducción en las dimensiones de éstas. Tanto la altura de la sección transversal (cara) como la anchura (canto) de las probetas decrecen un 0,12 % por cada % de contenido de humedad perdido.
- La velocidad de propagación de la onda o velocidad de vibración es mayor a medida que el contenido de humedad de la madera disminuye. Por ello, debido a la relación lineal existente entre ambas variables, existe una constante que refleja cuanto disminuye la velocidad de propagación por cada % que aumenta el contenido de humedad de las probetas. En ondas sónicas y ultrasónicas, esta constante hace que la velocidad de propagación disminuya un 0,4 % por cada 1 % de contenido de humedad que aumente la madera, mientras que en análisis de vibración es de 0,55 %.



- La relación lineal que existe entre el MOE estático ($E_{m,g}$) y el MOE dinámico estimado a través de NDT (E_S , E_F y E_P) es fuerte, con R^2 de 0,71 para onda ultrasónica, 0,67 para onda sónica y 0,81 para el análisis de vibraciones, por lo que esta buena predicción, junto con la facilidad de medición de las variables NDT, implica que la determinación del módulo de elasticidad de la madera a través del MOE de los equipos NDT sea una buena alternativa.
- Sin embargo para predecir la resistencia a flexión (MOR), ninguno de los módulos de elasticidad, tanto los determinados a través de las técnicas no destructivas (E_S , E_F y E_P) como los correspondientes al ensayo a flexión de las probetas ($E_{m,g}$ y $E_{m,l}$), explican más de un 43,3% la variabilidad de la resistencia a flexión.
- El módulo de elasticidad local ($E_{m,l}$) tiene una variabilidad algo mayor frente al módulo de elasticidad global ($E_{m,g}$), además presenta un menor poder de predicción de la resistencia a flexión de las probetas frente al módulo de elasticidad global, así como su mayor dificultad de medición durante el ensayo. Por efectos operativos, prevalece la medición del global frente al local y eso se refuerza por la mejora de predicción del MOR.
- En relación a la clase resistente asignada a cada probeta por el equipo de análisis de vibración (PLG), se observa que, a medida que se produce el secado de la madera y disminuye su contenido de humedad, cada probeta va pasando a formar parte de clases resistentes inferiores. Las probetas, que en contenidos de humedad superiores al 20 %, pertenecen a una clase resistente relativamente alta (C18), a medida que pierden humedad van pasando a formar parte de clases resistentes inferiores (C16 y C14) o, incluso, encontrarse fuera de la clasificación. Este hecho indica que la resistencia de las probetas frente a esfuerzos de flexión disminuye con el descenso del contenido de humedad de la madera.



8. BIBLIOGRAFÍA

- Adell, F.J., 2005. Comparación de las normas de clasificación de madera estructural española (UNE 56544) y alemana (DIN 4074) para madera de pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.) de procedencia alemana. Proyecto Fin de Carrera. E.T.S.I. de Montes. Universidad Politécnica de Madrid.
- Argüelles, R.; Arriaga, F; y Martínez, J. J., 2000. Estructuras de madera. Diseño y Cálculo. AITIM. Madrid. 663 Pp. P 1-53.
- Basterra, A.; Casado, M.; Acuña, L.; Pinazo, O., 2006. Techniques of pseudo-Non Destructive Testing on structural wood, by extraction of screws. ReCoPaR, nº2, june 2006. P 37-59.
- Bucur, V., 2006. Acoustics of Wood. 2nd Edition. Springer Series in Wood Science Springer, Berlin, Heidelberg, Germany.
- Capuz Lladró, R. (2005). Materiales Orgánicos. Maderas. Primera edición. Editorial Universidad Politécnica de Valencia. Valencia 279 p.
- Fernández-Golfín, J. L.; Díez, M. R.; Gutiérrez, A.; Baonza, M.V. y Alvarez, H., 1997 (b). Propiedades mecánicas y clasificación de la madera aserrada de uso estructural, de diferentes coníferas españolas. Congreso Forestal Español. P 171-176.
- Fernández-Golfín, J. I.; Díez, M. R.; Gutiérrez, A. (1998). Caracterización mecánica de la madera aserrada de uso estructural, clasificada visualmente de acuerdo con la norma UNE 56544. Materiales de Construcción, Vol. 48. nº 25. P 45 - 59



- Fernández- Golfín, J. I.; Díez, M. R.; Hermoso, E., 2001. Análisis y estado del arte de la técnica de clasificación mecánica por máquina de la madera aserrada estructural. Investigación agraria. Sistemas y recursos forestales Vol. 10 (1).
- Fernández- Golfín, J. I.; Díez, M. R.; Hermoso, E., 2003. Relaciones entre las variables clasificadoras de la madera estructural en los pinos silvestre y laricio de procedencia española. Materiales de construcción vol. 53 nº 270. P 45-55.
- Ceccoti, A.; Togni, M., 1996. NDT on ancient timber beams: assement of strength/stiffness properties combining visual and instrumental methods. 10th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, Lausanne.
- Conde, M.; Fernández-Golfín J. I.; Hermoso, E., 2007 Mejora de la predicción de la resistencia y rigidez de la madera estructural con el método de ultrasonidos combinado con parámetros de clasificación visual. Materiales de Construcción, Vol 57, No 288.
- Halabe, U; Gangadhar M.; Bidigalu, G.; GangaRao, H.; Ross, J., 1995. Nondestructive Evaluation of Green Wood Using Stress Wave and Transverse Vibration Techniques. Materials Evaluation, Vol. 55, No. 9, P. 1013-1018.
- Hermoso, E., 2001. Caracterización mecánica de la madera estructural de *Pinus sylvestris* L. Tesis doctoral. E.T.S.I. Montes. Universidad Politécnica de Madrid.
- Iñiguez, G., 2007. Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas de gran escuadría para uso estructural. Tesis doctoral. E.T.S.I. Montes. Universidad Politécnica de Madrid.
- Joly, P.; More-Chevalier, F., 1980. Theorie, pratique, economie du sechage des bois. Paris, France. Editions Vial.



- Kasal, B. Tannert T., 2010. In Situ Assessment of Structural Timber. State of the Art Report of the RILEM Technical Committee 215-AST. Springer. 152 p
- Rodríguez, I., 2009. Evaluación de la técnica no destructiva del georradar para la inspección, el diagnóstico y el análisis resistente de la madera. Tesis doctoral. Departamento de ingeniería cartográfica, geodésica y fotogramétrica. Universidad Politécnica de Valencia.
- Ross, R. J.; Pellerin, R. F., 1994. Nondestructive testing for assessing wood members in structures: a review. USDA Forest service, General Technical Report. FPL-GTR-70. Forest Products Laboratory. May 1994. 42 p.
- Sandoz, J.L., 1989. Grading of construction timber by ultrasound. Wood Science and Technology, 23. P. 95-108.
- Sobue, N., 1986b. Measurement of Young's modulus by the transient longitudinal vibration of wooden beams using a FFT spectrum analyser. Mokuzai Gakkaishi, Japan, 32(9). P 744-747.
- Vignote, S.; Martínez, I., 2006. Tecnología de la madera. 3ª edición Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. 678 p
- Wang, X.; Divos, F.; Pilon, C.; Brashaw, B. K. Ross, R. J. y Pellerin, R. F., 2004. Assessment of Decay in Standing Timber Using Stress Wave Timing Nondestructive Evaluation Tools. A Guide for Use and Interpretation. USDA Forest service, General Technical Report. FPL-GTR-147. Forest Products Laboratory. March 2004. 14 p.

Normativa



- UNE 56544: 2009. Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas. Asociación Española de Normalización y Certificación.
- UNE- EN 13183-2: 2002. Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 2: estimación por el método de resistencia eléctrica. Asociación Española de Normalización y Certificación.
- UNE-EN 408: 2011. Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas.
- UNE-EN 384: 2010. Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad.

Paginas web y bases de datos online

- Forest Product Laboratory USDA. <http://www.fpl.fs.fed.us/>
- Grupo de investigación en estructuras y tecnología de la madera. <http://www3.uva.es/maderas/>
- National Center for Wood Transportation Structures. Iowa State University. <http://www.woodcenter.org/>
- NDT Database & Journal of Nondestructive Testing. <http://www.ndt.net/>
- Scientific Electronic Library Online. <http://www.scielo.org>
- Society of Wood Science and Technology. <http://www.swst.org/>



9. ANEXOS

Anexo A. Estadillo para la clasificación visual, TND y ensayo de flexión

| GOBIERNO DE ESPAÑA MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN INIA Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria | | CIFOR-INIA LABORATORIO DE ESTRUCTURAS DE MADERA | |
|--|--|--|--|
| Proyecto: Influencia de la humedad en las propiedades mecánicas de la madera de gran escuadría para uso estructural | | Especie: <i>Pinus sylvestris</i> L. | |
| Aserradero: El Espinar (Segovia) | | | |
| Nº probeta: PS-07-H | Fase I: Clasificación visual: UNE 56544 y DIN 4074 | Fecha: 10/12/2010 | |
| Cara h (mm): 144 | | Peor sección $\Sigma \phi$ (mm): 33+12 | |
| Canto b (mm): 96 | | C.K.D.R.: $33+12/458 = 0,098$ A 64 cm del cho. (decho) | |
| Long. L (mm): 3568 | | Bolsa de resina l/a (mm): - / - | |
| Nudo de CARA ϕ_1 (mm): - | | Entrecasco l/a (mm): 390/55* / 345/30 *Fuera apoyo | |
| Nudo de CANTO ϕ_2 (mm): - | | Fibra máx.: x / y (mm): 15 / 70 | |
| Nudo de CARA ϕ_3 (mm): 30 | | Mad. comp.: long. / anch. (mm): - / - | |
| Nudo de CANTO ϕ_4 (mm): 33 | | Fendas: long / prof (mm): - | |
| Médula (sí o no): NO | | Gemás: long. / h' / b' (mm): 220 / 40 / 19 fuera de apoyo | |
| Curv. CARA x (mm): | | Observaciones: H=27,3% | |
| Curv. CANTO y (mm): | | Humedad en aserradero (%): 42. | |
| Alabeo z (mm): | | * b1 h | |
| Alteraciones biológicas (sí o no): NO | | | |
| Fase II: TND | | | |
| Sylvestest | | FAKOPP Microsecond Timer | |
| Lectura: | Fecha Humedad (%) Tiempo (µs): | Lectura: | Fecha Humedad (%) Tiempo (µs): |
| Testa - Testa | 16/12/10 763 | Testa - Testa | 16/12/10 750 |
| Testa - Testa | " " 777 | Testa - Testa | " " 755 |
| Testa - Testa | 22/12/10 733 | Testa - Testa | 22/12/10 738 |
| Testa - Testa | 22/12/10 749 | Testa - Testa | " " 752 |
| Testa - Testa | 24/12/10 712 | Testa - Testa | 28/12/10 720 |
| Testa - Testa | " " 727 | Testa - Testa | " " 736 |
| Testa - Testa | 7/1/11 711 | Testa - Testa | 7/1/11 715 |
| Testa - Testa | " " 730 | Testa - Testa | " " 728 |
| Testa - Testa | 19/1/11 702 | Testa - Testa | 19/1/11 705 |
| Testa - Testa | " " 718 | Testa - Testa | " " 720 |
| Testa - Testa | 31/1/11 704 | Testa - Testa | 31/1/11 696 |
| Testa - Testa | " " 715 | Testa - Testa | " " 705 |
| Observaciones: | | Fakopp en aserradero (µs): 793 | |
| | | Equipo E.T.S.I.M. | |
| Portable Lumber Grader | | Portable Lumber Grader | |
| Fecha: 16/12/10 Masa (kg): 2*12,79 | Frecuencia (Hz): 606 C.R.: C24 | Fecha: 22/12/10 Masa (kg): 2*12,42 | Frecuencia (Hz): 624 C.R.: C22 |
| MOE _{dimeal} (GPa)/ MOE _{calc} : 11,7 / 11,1 | Frecuencia en flexión (Hz): CTO/CARA / | MOE _{dimeal} (GPa)/ MOE _{calc} : 11,1 / 10,5 | Frecuencia en flexión (Hz): CTO/CARA / |
| Portable Lumber Grader | | Portable Lumber Grader | |
| Fecha: 7/1/11 Masa (kg): 2*11,99 | Frecuencia (Hz): 644 C.R.: C18 | Fecha: 19/1/2011 Masa (kg): 2*11,85 | Frecuencia (Hz): 654 C.R.: C22 |
| MOE _{dimeal} (GPa)/ MOE _{calc} : 10,4 / 9,8 | Frecuencia en flexión (Hz): CTO/CARA / | MOE _{dimeal} (GPa)/ MOE _{calc} : 10,6 / 10 | Frecuencia en flexión (Hz): CTO/CARA / |
| Portable Lumber Grader | | Portable Lumber Grader | |
| Fecha: 31/01/2011 Masa (kg): 2*11,73 | Frecuencia (Hz): 665 C.R.: C18 | Fecha: 31/01/2011 Masa (kg): 2*11,73 | Frecuencia (Hz): 665 C.R.: C18 |
| MOE _{dimeal} (GPa)/ MOE _{calc} : 10,5 / 9,9 | Frecuencia en flexión (Hz): CTO/CARA / | MOE _{dimeal} (GPa)/ MOE _{calc} : 10,5 / 9,9 | Frecuencia en flexión (Hz): CTO/CARA / |
| Portable Lumber Grader | | Portable Lumber Grader | |
| Fecha: Masa (kg): 2* | Frecuencia (Hz): C.R.: | Fecha: Masa (kg): 2* | Frecuencia (Hz): C.R.: |
| MOE _{dimeal} (GPa)/ MOE _{calc} : / | Frecuencia en flexión (Hz): CTO/CARA / | MOE _{dimeal} (GPa)/ MOE _{calc} : / | Frecuencia en flexión (Hz): CTO/CARA / |
| Observaciones: | | Archivo PLG: Vigas humedad 2010 | |
| | | " 01 | |
| | | " 02 | |

Nº probeta: PS-13-H

Ensayo Flexión UNE-EN 408 (26 probetas Pinus sylvestris)

| Resultados de ensayo | |
|----------------------------|-------------------------|
| Fecha: | 27/09/11 |
| Técnico: | Jaime |
| Carga última (kN): | 38,15 |
| Pend. Emgcto PCTO (mm/kN): | 1,5233 |
| MOEGCTO (MPa): | 10561 |
| Pend. Ecen PEL (mm/kN): | 0,13008 |
| MOEL (MPa): | — |
| MOR (MPa): | 56,135 |
| Tiempo de ensayo (s): | 300 |
| Notas: | vel 0,1/0,1 Alarma 10kN |

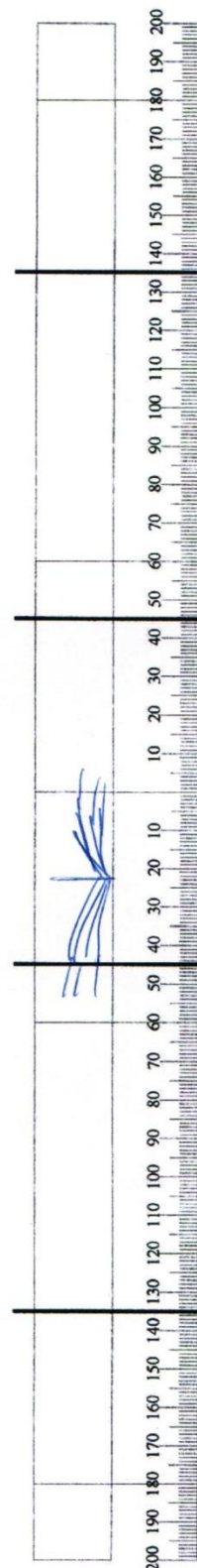
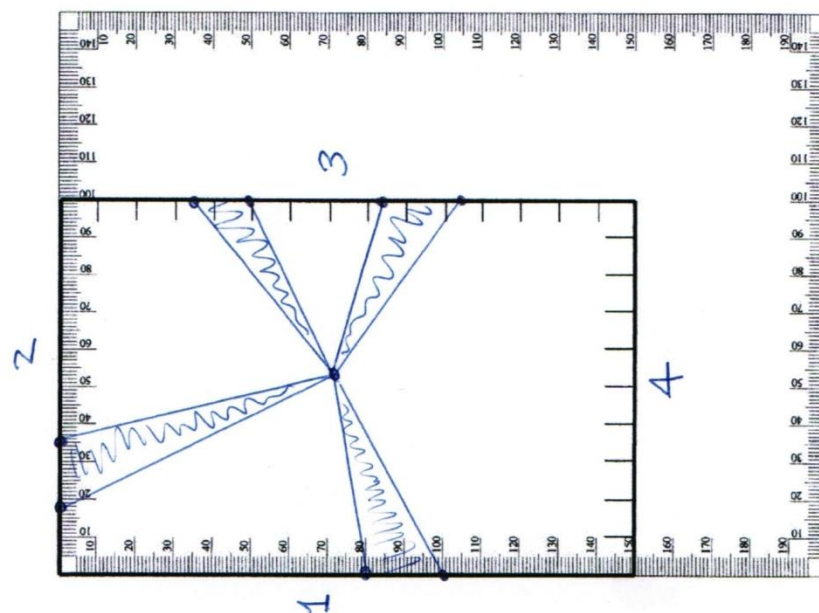
| Rotura | |
|-----------------------------|-----|
| Posición desde centro (mm): | 225 |
| ¿Tercio central? (±450 mm) | SI |
| Tracción: | SI |
| Compresión: | NO |
| Cortante: | NO |
| Nudo en cara: | SI |
| Nudo en canto: | — |
| Desv. Fibra: | — |
| Humedad (%): | 8,8 |
| Fotografía (archivo/s): | — |

| Rebanada A | |
|---------------|---------|
| Numeración: | PS13H I |
| Espesor (mm): | |

| Rebanada B | |
|-------------------------|----------|
| Numeración: | PS13H II |
| Arranque tornillo (kN): | |
| Pyloadin prof. (mm): | |

Notas:

Sección de rotura:





Anexo B. Estadillo de humedad

| Condiciones: | | Humedad Relativa: 34,3%. Temperatura: 18,0° (INIA 10. 14/02/2011) | | | | ; Humedad Relativa: 31,9°. Temperatura: 16,8° INIA 11. 28/02/2011 | | | | |
|----------------|------------|---|------------------|----------------------|----------------|---|--------|------------------|----------------------|---------|
| | | H (%) INIA 10 | | | H (%) INIA 11 | | | | | |
| Xilohigrómetro | Tirafondos | Clavos | Clavos aislantes | Clavos aislantes 1/3 | Xilohigrómetro | Tirafondos | Clavos | Clavos aislantes | Clavos aislantes 1/3 | Pieza |
| 14,5 | 17,4 | 16,2 | - | 13,4 | 14,4 | 15,9 | 14,9 | - | 12,2 | PS-01-H |
| 13,1 | 15,7 | 14,3 | - | - | 12,8 | 14,9 | 13,4 | - | - | PS-02-H |
| 14,3 | 16,2 | 15,3 | 13,7 | 10,4 | 13,8 | 15,2 | 14,3 | 12,7 | 12,1 | PS-03-H |
| 13,1 | 14,0 | 13,2 | - | - | 12,3 | 13,8 | 12,0 | - | - | PS-04-H |
| 9,7 | 10,0 | 10,0 | 13,3 | 12,0 | 12,1 | 13,8 | 11,1 | 12,2 | 11,0 | PS-05-H |
| 14,8 | 16,3 | 15,6 | - | - | 14,8 | 15,2 | 14,5 | - | - | PS-06-H |
| 14,7 | 15,4 | 14,4 | 13,6 | 13,1 | 14,0 | 14,3 | 13,3 | 12,5 | 12,1 | PS-07-H |
| 12,4 | 15,2 | 13,2 | - | - | 11,9 | 12,6 | 11,5 | - | - | PS-08-H |
| 12,0 | 13,5 | 12,3 | 12,1 | 10,7 | 11,1 | 12,4 | 11,5 | 11,1 | 10,0 | PS-09-H |
| 15,3 | 16,7 | 16,9 | - | - | 14,4 | 15,4 | 14,7 | - | - | PS-10-H |
| 14,9 | 14,7 | 14,1 | - | - | 14,6 | 13,7 | 12,9 | - | - | PS-11-H |
| 13,2 | 15,6 | 14,7 | - | - | 13,1 | 14,6 | 13,9 | - | - | PS-12-H |
| 16,8 | 17,2 | 16,5 | - | - | 15,5 | 15,9 | 16,0 | - | - | PS-13-H |
| 14,9 | 15,5 | 15,0 | - | - | 11,3 | 14,1 | 13,7 | - | - | PS-14-H |
| 14,8 | 15,5 | 14,9 | - | - | 12,1 | 14,2 | 13,7 | - | - | PS-15-H |
| 15,4 | 16,3 | 15,2 | - | - | 15,2 | 15,5 | 14,3 | - | - | PS-16-H |
| 19,4 | 23,3 | 21,1 | - | - | 18,7 | 20,3 | 20,4 | - | - | PS-17-H |
| 14,5 | 14,9 | 14,0 | - | - | 12,1 | 13,8 | 13,2 | - | - | PS-18-H |
| 13,8 | 13,8 | 15,0 | - | - | 12,2 | 13,6 | 12,5 | - | - | PS-19-H |
| 17,0 | 18,3 | 17,5 | - | - | 15,1 | 16,6 | 16,0 | - | - | PS-20-H |
| 14,0 | 14,8 | 14,2 | - | - | 13,5 | 13,8 | 13,0 | - | - | PS-21-H |
| 13,8 | 15,2 | 13,9 | - | - | 12,6 | 13,9 | 12,8 | - | - | PS-22-H |
| 13,5 | 18,5 | 18,0 | - | - | 16,8 | 16,9 | 16,6 | - | - | PS-23-H |
| 16,0 | 16,3 | 17,4 | - | - | 13,8 | 15,5 | 14,9 | - | - | PS-24-H |
| 13,7 | 14,3 | 13,5 | - | - | 13,1 | 13,5 | 12,7 | - | - | PS-25-H |
| 15,5 | 16,9 | 16,2 | - | - | 14,7 | 15,3 | 14,8 | - | - | PS-26-H |



Anexo C. Símbolos utilizados

| Símbolo | Definición | Unidades |
|--------------|--|----------|
| Probeta | Código de la probeta | - |
| D | Días que han transcurrido desde primera medición de la humedad, en aserradero | Días |
| HX | Medida de la humedad de la madera obtenida mediante el xilohigrómetro | % |
| HT | Medida de la humedad de la madera obtenida mediante xilohigrómetro a través de su conexión a tirafondos | % |
| HC | Medida de la humedad de la madera obtenida mediante xilohigrómetro a través de su conexión a clavos | % |
| HA | Medida de la humedad de la madera obtenida mediante xilohigrómetro a través de su conexión a clavos aislados | % |
| HL | Medida de la humedad de la madera obtenida mediante xilohigrómetro a través de su conexión a clavos aislados clavados a 1/3 de profundidad | % |
| SS | Velocidad obtenida mediante Sylvatest de lectura directa testa (parte superior)-testa (parte superior) | m/s |
| SI | Velocidad obtenida mediante Sylvatest de lectura directa testa (parte inferior)-testa (parte inferior) | m/s |
| SM | Velocidad obtenida a partir de la media aritmética de las dos mediciones realizadas con Sylvatest en cada probeta | m/s |
| FS | Velocidad obtenida mediante Microsecond Timer de lectura directa testa (parte superior)-testa (parte superior) | m/s |
| FI | Velocidad obtenida mediante Microsecond Timer de lectura directa testa (parte inferior)-testa (parte inferior) | m/s |
| FM | Velocidad obtenida a partir de la media aritmética de las dos mediciones realizadas con Microsecond Timer en cada probeta | m/s |
| P | Velocidad obtenida mediante Portable Lumber Grader (PLG) | m/s |
| M | Masa de la probeta | kg |
| Carga última | Carga máxima necesaria para provocar la ruptura de la probeta | kN |



| | | |
|-----------|---|--------|
| PCTO | Pendiente resultante de la representación deformación-carga en el canto | mm/ kN |
| MOEGCTO | Modulo de elasticidad en canto | MPa |
| PEL | Pendiente resultante de la representación deformación-carga en el centro de la probeta | mm/kN |
| MOR | Modulo de rotura o resistencia a flexión de las probeta | MPa |
| t | Tiempo de duración del ensayo | s |
| $E_{m,g}$ | Módulo de elasticidad global, determinado a partir de la pendiente PCTO | MPa |
| $E_{m,l}$ | Módulo de elasticidad local, determinado a partir de la pendiente PEL | MPa |
| E_S | Modulo de elasticidad dinámico de las probetas obtenido a partir de la velocidad de propagación de las ondas mediante Sylvatest | MPa |
| E_F | Modulo de elasticidad dinámico de las probetas obtenido a partir de la velocidad de propagación de las ondas mediante MST | MPa |
| E_P | Modulo de elasticidad dinámico de las probetas obtenido a partir del análisis de vibración mediante PLG | MPa |



Anexo D. Análisis de la varianza (ANOVA) de las diferentes variables

Al igual que en el capítulo 5, se muestran a continuación los análisis de la varianza, aunque de forma más explícita, de las diferentes variables que han sido determinadas a través de diversos procedimientos.

Estas variables son: contenido de humedad de las probetas, velocidad de propagación de las ondas a través de las probetas y módulo de elasticidad de las mismas.

El análisis de la varianza implica el cumplimiento de los siguientes aspectos:

- Las poblaciones, o el conjunto de datos correspondientes a cada factor, siguen una distribución normal.
- Las K muestras sobre las que se aplican los tratamientos son independientes.
- Todas las poblaciones tienen una varianza similar.

Se trata de un contraste es fundamental en el análisis de resultados experimentales, en los que interesa comparar los resultados de K procedimientos o factores con respecto a la variable en cuestión.

El ANOVA se basa en la descomposición de la variación total de los datos con respecto a la media global (SCT) en dos partes, bajo el supuesto de que H_0 es cierta:

- Variación dentro de las muestras (SCD) o intra-grupos, cuantifica la dispersión de los valores de cada muestra con respecto a sus correspondientes medias.
- Variación entre muestras (SCE) o inter-grupos, cuantifica la dispersión de las medias de las muestras con respecto a la media global.

Se manejan dos hipótesis:

Hipótesis nula, $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k = \mu$

Hipótesis alternativa, $H_1: \exists \mu_j \neq \mu \quad j = 1, 2, \dots, K$



Las expresiones para el cálculo de los elementos que intervienen en el análisis son las siguientes:

$$\text{Media global: } X = \frac{\sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^{n_j} x_{ij}}{n}$$

$$\text{Variación total: } SCT = \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^{n_j} (x_{ij} - \bar{X})^2$$

$$\text{Variación intra – grupos: } SCD = \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^{n_j} (x_{ij} - \bar{X}_j)^2$$

$$\text{Variación inter – grupos: } SCE = \sum_{j=1}^K (\bar{X}_j - \bar{X})^2 \cdot n_j$$

Siendo x_{ij} el i -ésimo valor de la muestra j -ésima, n_j el tamaño de dicha muestra y \bar{X}_j su media.

El valor F será:

$$F = \frac{\frac{SCE}{k-1}}{\frac{SCD}{n-K}}$$

- Si $F < F_{\text{critico}}$, se acepta la hipótesis nula y, por lo tanto, la igualdad en las medias.
- Si $F > F_{\text{critico}}$, se rechaza la hipótesis nula, por lo que existen diferencias entre las medias (Figura 8.1).

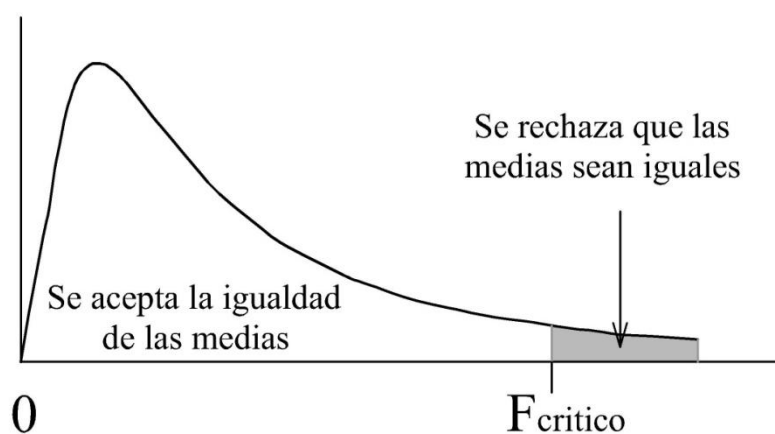


Figura 9.1 Función de distribución F

Análisis de la varianza para el contenido de humedad según los diferentes procedimientos

La variable contenido de humedad de las probetas ha sido determinada a través de cinco procedimientos diferentes. Estos procedimientos se corresponden con los distintos tipos de electrodos utilizados y, por lo tanto, son el factor del análisis de la varianza.

Por medio de este análisis se comparan los valores medios del contenido de humedad correspondientes a los diferentes grupos o factores a través de los cuales se ha determinado dicha variable.



Análisis de la varianza para el contenido de humedad según las diferentes metodologías empleadas

Se realiza un análisis de la varianza para la variable contenido de humedad siendo el factor el procedimiento utilizado para medir la variable, para valores de humedad próximos al 30%.

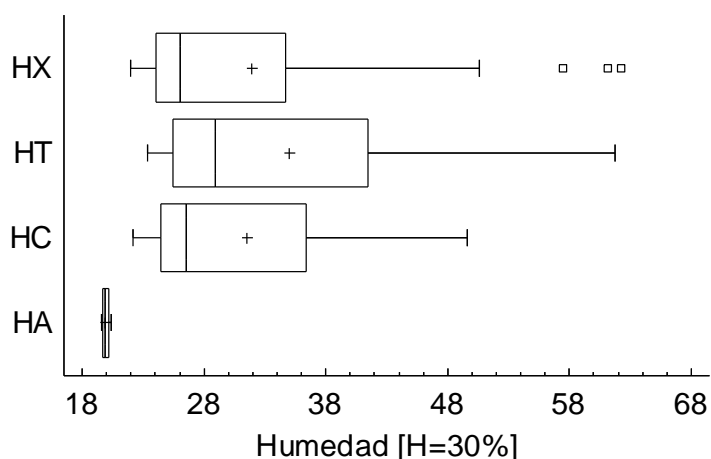


Figura 9.2 Gráfico de cajas y bigotes del contenido de humedad ($H \approx 30\%$)

En la figura 9.2, la cruz representa los valores medio. En cuanto a la caja, las líneas izquierda, central y derecha representa el primer, segundo (o mediana) y tercer cuantil. El bigote de la izquierda muestra el valor mínimo y el de la derecha el valor máximo.

La tabla del análisis ANOVA es la siguiente:

| Origen de las variaciones | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Promedio de los cuadrados | F | Probabilidad | Valor crítico para F |
|---------------------------|-------------------|--------------------|---------------------------|------|--------------|----------------------|
| Entre grupos | 820,66 | 3 | 273,55 | 2,19 | 0,095 | 2,72 |
| Dentro de los grupos | 9732,50 | 78 | 124,78 | | | |
| Total | 10553,16 | 81 | | | | |

Tabla 9.1 Análisis de la varianza del contenido de humedad a través de los diferentes procedimientos ($H \approx 30\%$)



Debido a que el valor F es menor que su valor crítico, es decir $2,19 < 2,72$, no existen diferencias significativas entre grupos, para un nivel de significación del 95%.

Debido a que la probabilidad¹ es superior a 0,05, se acepta la hipótesis nula y, por lo tanto, no existe diferencia significativa entre los valores de humedad en función del procedimiento de medida empleado, para un nivel de confianza del 95,0%.

De igual manera, para contenidos de humedad cercanos al 20%.

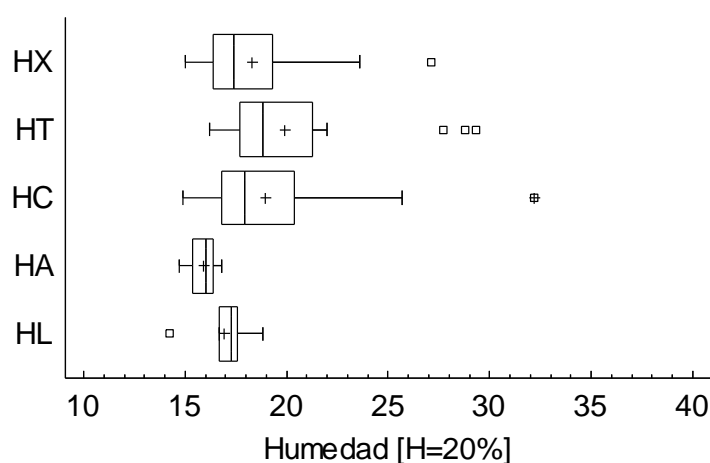


Figura 9.3 Gráfica de cajas y bigotes del contenido de humedad ($H \approx 20\%$)

La tabla del análisis ANOVA es la siguiente:

| Origen de las variaciones | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Promedio de los cuadrados | F | Probabilidad | Valor crítico para F |
|---------------------------|-------------------|--------------------|---------------------------|------|--------------|------------------------|
| Entre grupos | 92,12 | 4 | 23,03 | 2,06 | 0,094 | 2,48 |
| Dentro de los grupos | 917,29 | 82 | 11,186 | | | |
| Total | 1009,40 | 86 | | | | |

Tabla 9.2 Análisis de la varianza del contenido de humedad a través de los diferentes procedimientos ($H \approx 20\%$)

¹ La probabilidad o p-valor es probabilidad de obtener un resultado al menos tan extremo como el que realmente se ha obtenido, suponiendo que la hipótesis nula es cierta.



Al igual que en el caso anterior, F es menor que su valor crítico ($2,06 < 2,48$) y la probabilidad es mayor que 0,05 no existen diferencias significativas entre grupos, para un nivel de significación del 95%.

Por ultimo, para contenidos de humedad próximos al 12%.

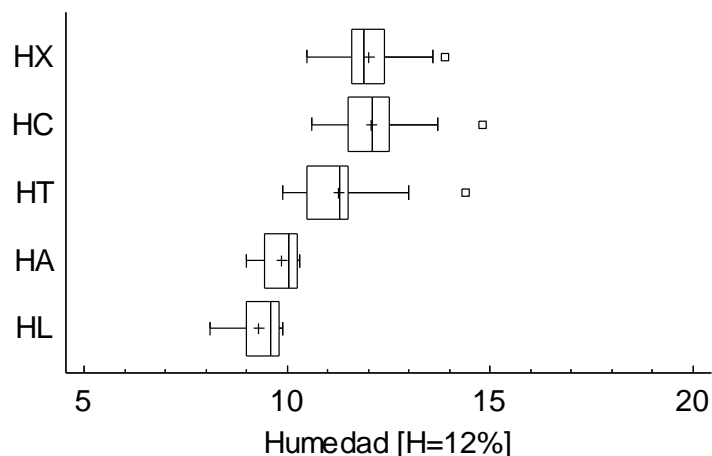


Figura 9.4 Gráfica de cajas y bigotes del contenido de humedad ($H \approx 12\%$)

La tabla del análisis ANOVA es la siguiente:

| Origen de las variaciones | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Promedio de los cuadrados | F | Probabilidad | Valor crítico para F |
|---------------------------|-------------------|--------------------|---------------------------|-------|--------------|------------------------|
| Entre grupos | 52,24 | 4 | 13,059 | 15,34 | 0 | 2,48 |
| Dentro de los grupos | 69,82 | 82 | 0,85 | | | |
| Total | 122,06 | 86 | | | | |

Tabla 9.3 Análisis de la varianza del contenido de humedad a través de los diferentes procedimientos ($H \approx 12\%$)

En este caso, F es mayor que su valor crítico así como la probabilidad se anula, se rechaza la hipótesis nula y, por lo tanto, existe diferencia significativa entre los valores de humedad en función del procedimiento de medida empleado, para un nivel de confianza del 95,0%.



Análisis de la varianza para la velocidad de propagación según los diferentes equipos

De la misma manera que para el contenido de humedad, se realizan los análisis de la varianza para la variable velocidad de propagación, siendo el factor el equipo utilizado.

Para esta variable el valor de F es siempre mayor que su valor crítico y la probabilidad es nula, por lo que se rechaza la hipótesis nula, existiendo diferencia significativa entre los valores de velocidad de propagación según el equipo de medida, para un nivel de confianza del 95,0%.

Para valores de contenido de humedad próximos al 30%, se tiene:

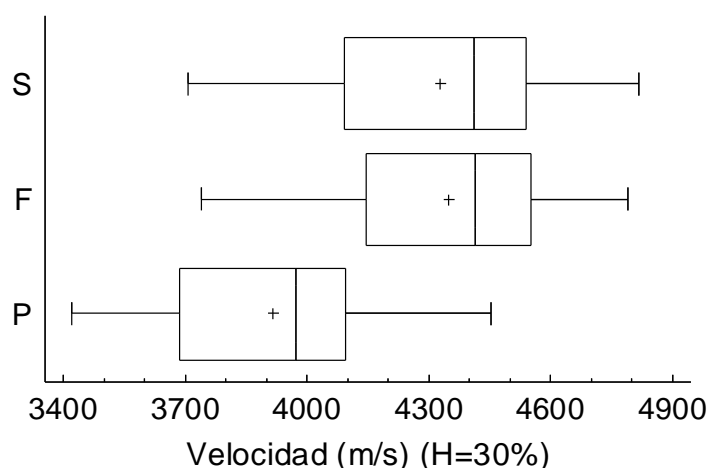


Figura 9.5 Gráfico de cajas y bigotes de la velocidad de propagación ($H \approx 30\%$)

La tabla del análisis ANOVA es la siguiente:

| <i>Origen de las variaciones</i> | <i>Suma de cuadrados</i> | <i>Grados de libertad</i> | <i>Promedio de los cuadrados</i> | <i>F</i> | <i>Probabilidad</i> | <i>Valor crítico para F</i> |
|----------------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------------|----------|---------------------|-----------------------------|
| Entre grupos | 3100894,8 | 2 | 1550447,43 | 20,03 | 0 | 3,12 |
| Dentro de los grupos | 5804368,9 | 75 | 77391,59 | | | |
| Total | 8905263,8 | 77 | | | | |

Tabla 9.4 Análisis de la varianza de la velocidad de propagación para los tres equipos de medida ($H \approx 30\%$)



Para contenidos de humedad cercanos al 20%.

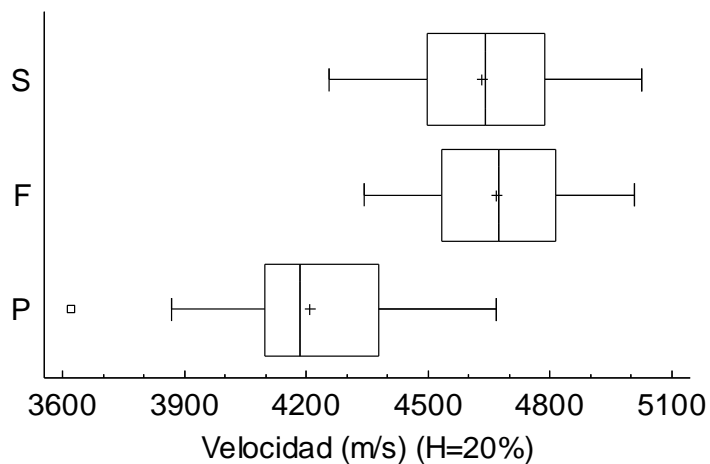


Figura 9.6 Gráfico de cajas y bigotes de la velocidad de propagación ($H \approx 20\%$)

La tabla del análisis ANOVA es la siguiente:

| Origen de las variaciones | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Promedio de los cuadrados | F | Probabilidad | Valor crítico para F |
|---------------------------|-------------------|--------------------|---------------------------|-------|--------------|----------------------|
| Entre grupos | 3364078,6 | 2 | 1682039,34 | 41,48 | 0 | 3,12 |
| Dentro de los grupos | 3040972,9 | 75 | 40546,30 | | | |
| Total | 6405051,6 | 77 | | | | |

Tabla 9.5 Análisis de la varianza de la velocidad de propagación para los tres equipos de medida ($H \approx 20\%$)

Y por último, para humedades cercanas al 12%.

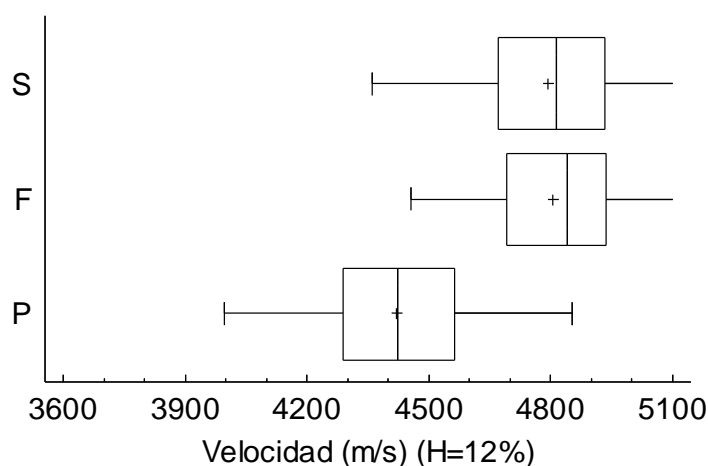


Figura 9.7 Gráfico de cajas y bigotes de la velocidad de propagación ($H \approx 12\%$)

La tabla del análisis ANOVA es la siguiente:

| Origen de las variaciones | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Promedio de los cuadrados | F | Probabilidad | Valor crítico para F |
|---------------------------|-------------------|--------------------|---------------------------|-------|--------------|----------------------|
| Entre grupos | 2464597,9 | 2 | 1232298,97 | 30,41 | 0 | 3,12 |
| Dentro de los grupos | 3039297 | 75 | 40523,96 | | | |
| Total | 5503894,9 | 77 | | | | |

Tabla 9.6 Análisis de la varianza de la velocidad de propagación para los tres equipos de medida ($H \approx 12\%$)

Análisis de la varianza para el módulo de elasticidad según los diferentes equipos

El módulo de elasticidad de las probetas se determina a través de cuatro procedimientos diferentes. Por un lado a través de técnicas no destructivas y, por otro, a través de ensayo mecánico a flexión.

En la figura 9.8 se observa las diferencias existentes entre las medias del modulo de elasticidad.

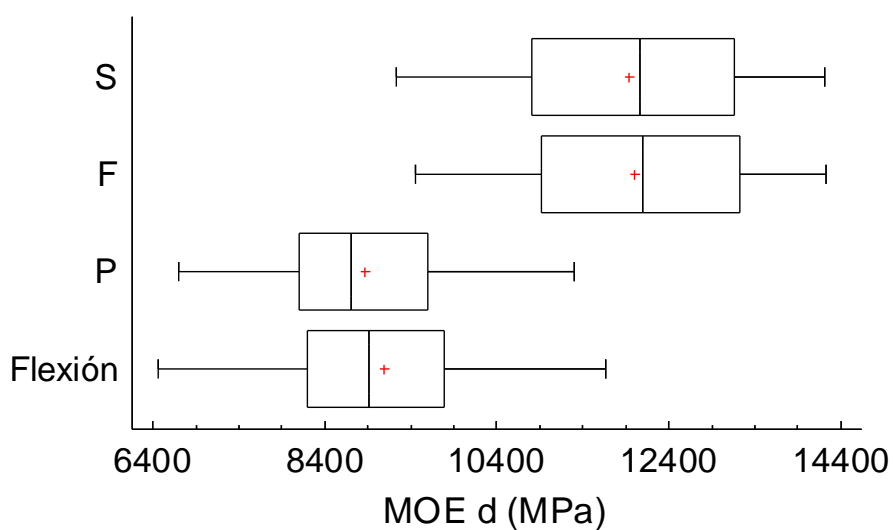


Figura 9.8 Gráfico de cajas y bigotes del módulo de elasticidad determinado a través de diferentes métodos

| Origen de las variaciones | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Promedio de los cuadrados | F | Probabilidad | Valor crítico para F |
|---------------------------|-------------------|--------------------|---------------------------|-------|--------------|----------------------|
| Entre grupos | 225656542 | 3 | 75218847,2 | 45,58 | 0 | 2,697 |
| Dentro de los grupos | 161706260 | 98 | 1650063,88 | | | |
| Total | 387362801 | 101 | | | | |

Tabla 9.7 Análisis de la varianza para la variable módulo de elasticidad

Por otro lado, el valor F obtenido es mayor que su valor crítico y la probabilidad se anula, por lo que confirma que existen diferencias significativas entre procedimientos.



Anexo E. Datos obtenidos

Contenido de humedad

| Probeta | HX0 (0) ² | HX1 (7) | HX2 (14) | HX3 (18) | HX4 (20,5) | HT4 (20,5) | HC4 (20,5) | HA4 (20,5) |
|---------|-------------------------|------------|-------------|-------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| PS-01-H | 41,5 | 41,9 | 66,2 | 34,0 | 29,5 | 43,5 | 37,0 | - |
| PS-02-H | - | - | 44,8 | 42,7 | 29,3 | 36,2 | 33,7 | - |
| PS-03-H | 35,6 | 38,1 | 31,1 | 26,4 | 27,3 | 38,1 | 34,6 | 23,7 |
| PS-04-H | - | - | 50,4 | 25,7 | 21,8 | 29,4 | 27,1 | - |
| PS-05-H | 40,3 | 33,9 | 26,4 | 27,9 | 25,9 | 36,0 | 34,3 | 24,2 |
| PS-06-H | - | - | 34,5 | 32,3 | 29,2 | 38,3 | 37,2 | - |
| PS-07-H | 42,0 | 31,5 | 27,3 | 26,4 | 27,6 | 34,1 | 32,0 | 23,5 |
| PS-08-H | - | - | 29,9 | 25,3 | 30,6 | 36,4 | 35,2 | - |
| PS-09-H | 37,6 | 33,6 | 35,6 | 45,2 | 34,5 | 42,6 | 41,0 | 24,4 |
| PS-10-H | - | - | 43 | 32,8 | 31,2 | 40,3 | 38,4 | - |
| PS-11-H | 42,8 | 34,5 | 31,5 | 31,0 | 23,7 | 31,9 | 28,7 | - |
| PS-12-H | - | - | 39,3 | 46,7 | 37,0 | 41,6 | 40,7 | - |
| PS-13-H | - | - | 39,8 | 40,8 | 40,3 | 59,0 | 49,8 | - |
| PS-14-H | 37,7 | 39,6 | 61,1 | 68,6 | 58,3 | 59,0 | 58,8 | - |
| PS-15-H | 66,1 | 36,4 | 60,5 | 71,3 | 64,4 | 69,8 | 67,1 | - |
| PS-16-H | - | - | 35,1 | 28,5 | 28,4 | 34,2 | 32,3 | - |
| PS-17-H | - | - | 39,5 | 43,1 | 39,2 | 56,4 | 52,8 | - |
| PS-18-H | 37,4 | 29,3 | 44,8 | 30,5 | 29,9 | 38,4 | 33,7 | - |
| PS-19-H | - | - | 45,8 | 36,1 | 26,6 | 33,0 | 31,5 | - |
| PS-20-H | 84,7 | 40,1 | 74,1 | 75,3 | 68,2 | 73,0 | 70,1 | - |
| PS-21-H | - | - | 33,8 | 32,8 | 26,8 | 39,0 | 36,5 | - |
| PS-22-H | - | - | 41,8 | 44,3 | 30,3 | 39,5 | 36,0 | - |
| PS-23-H | 84,0 | 37,1 | 65,4 | 67,7 | 61,8 | 68,3 | 64,9 | - |
| PS-24-H | 41,5 | 32,1 | 40,5 | 30,5 | 27,2 | 46,9 | 36,7 | - |
| PS-25-H | - | - | 32,6 | 29,5 | 25,4 | 31,6 | 30,4 | - |
| PS-26-H | - | - | 36,8 | 65,5 | 49,7 | 61,2 | 54,1 | - |

² Entre paréntesis aparecen los días transcurridos desde la selección de las probetas en el aserradero.



| Probeta | HX5 (26) | HT5 (26) | HC5 (26) | HA5 (26) | HX6 (32) | HT6 (32) | HC6 (32) | HA6 (32) |
|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| PS-01-H | 28,6 | 36,4 | 33,0 | - | 22,8 | 32,1 | 26,7 | - |
| PS-02-H | 24,4 | 28,6 | 25,3 | - | 18,0 | 23,5 | 21,1 | - |
| PS-03-H | 24,1 | 27,5 | 26,0 | 19,9 | 23,6 | 24,1 | 22,4 | 19,4 |
| PS-04-H | 22,1 | 23,6 | 22,2 | - | 20,0 | 20,5 | 19,4 | - |
| PS-05-H | 23,9 | 24,7 | 24,2 | 20,4 | 22,5 | 22,4 | 21,8 | 19,2 |
| PS-06-H | 29,8 | 32,8 | 31,3 | - | 20,4 | 26,0 | 26,0 | - |
| PS-07-H | 22,0 | 23,4 | 22,8 | 19,6 | 19,9 | 21,6 | 20,9 | 18,2 |
| PS-08-H | 23,4 | 24,7 | 25,1 | - | 19,8 | 20,5 | 19,8 | - |
| PS-09-H | 23,5 | 24,4 | 22,5 | 19,8 | 18,2 | 20,4 | 19,2 | 17,7 |
| PS-10-H | 33,2 | 35,7 | 33,4 | - | 23,6 | 29,6 | 28,2 | - |
| PS-11-H | 25,3 | 27,6 | 25,2 | - | 22,9 | 23,3 | 22,0 | - |
| PS-12-H | 27,7 | 28,3 | 26,3 | - | 21,3 | 22,7 | 21,6 | - |
| PS-13-H | 44,5 | 52,3 | 41,6 | - | 28,8 | 35,3 | 30,8 | - |
| PS-14-H | 37,3 | 38,5 | 36,4 | - | 25,0 | 28,2 | 26,8 | - |
| PS-15-H | 50,6 | 45,0 | 41,4 | - | 29,6 | 30,8 | 29,4 | - |
| PS-16-H | 27,4 | 29,2 | 26,2 | - | 22,2 | 24,0 | 22,5 | - |
| PS-17-H | 34,7 | 56,0 | 49,6 | - | 28,0 | 49,0 | 40,5 | - |
| PS-18-H | 22,8 | 27,3 | 24,4 | - | 20,7 | 22,3 | 20,8 | - |
| PS-19-H | 24,4 | 25,0 | 23,4 | - | 20,1 | 23,5 | 20,1 | - |
| PS-20-H | 61,1 | 61,7 | 49,3 | - | 53,8 | 51,7 | 42,2 | - |
| PS-21-H | 26,7 | 28,2 | 26,8 | - | 20,6 | 22,5 | 21,9 | - |
| PS-22-H | 24,6 | 30,6 | 27,0 | - | 20,9 | 23,3 | 21,3 | - |
| PS-23-H | 62,2 | 58,1 | 49,5 | - | 40,5 | 45,0 | 38,2 | - |
| PS-24-H | 24,1 | 41,5 | 33,2 | - | 24,4 | 36,4 | 29,7 | - |
| PS-25-H | 24,7 | 25,4 | 24,5 | - | 20,1 | 21,5 | 20,8 | - |
| PS-26-H | 57,5 | 53,4 | 48,2 | - | 43,5 | 45,6 | 41,7 | - |



| Probeta | HX7 (42) | HT7 (42) | HC7 (42) | HA7 (42) | HX8 (54) | HT8 (54) | HC8 (54) | HA8 (54) | HL8 (54) |
|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| PS-01-H | 24,0 | 26,6 | 23,6 | | 20,3 | 22,0 | 20,7 | | 18,8 |
| PS-02-H | 18,1 | 20,8 | 18,7 | | 15,0 | 18,6 | 16,8 | | |
| PS-03-H | 20,2 | 22,8 | 20,9 | 17,8 | 18,2 | 20,9 | 18,9 | 16,8 | 16,7 |
| PS-04-H | 17,7 | 18,8 | 17,6 | | 15,9 | 16,6 | 15,6 | | |
| PS-05-H | 16,9 | 20,2 | 19,0 | 18,3 | 17,9 | 17,8 | 16,5 | 16 | 17,6 |
| PS-06-H | 20,4 | 21,9 | 21,7 | | 16,8 | 19,3 | 18,7 | | |
| PS-07-H | 17,9 | 20,8 | 19,2 | 17,7 | 17,3 | 18,3 | 17,2 | 16 | 17,3 |
| PS-08-H | 16,5 | 18,8 | 17,3 | | 15,1 | 16,2 | 15,2 | | |
| PS-09-H | 17,3 | 19,0 | 17,3 | 17,1 | 15,2 | 16,2 | 14,9 | 14,7 | 14,2 |
| PS-10-H | 23,2 | 24,2 | 22,9 | - | 17,6 | 20,1 | 19,4 | - | - |
| PS-11-H | 20,9 | 20,4 | 19,7 | - | 17,5 | 17,8 | 17,0 | - | - |
| PS-12-H | 19,4 | 20,7 | 20,8 | - | 16,6 | 18,0 | 17,0 | - | - |
| PS-13-H | 22,4 | 26,4 | 24,9 | - | 19,8 | 21,3 | 20,4 | - | - |
| PS-14-H | 20,2 | 22,9 | 21,3 | - | 17,0 | 19,1 | 18,2 | - | - |
| PS-15-H | 20,4 | 23,8 | 22,5 | - | 17,8 | 20,0 | 18,3 | - | - |
| PS-16-H | 20,0 | 21,6 | 20,2 | - | 18,8 | 19,3 | 17,9 | - | - |
| PS-17-H | 24,9 | 40,8 | 34,1 | - | 23,5 | 27,7 | 32,2 | - | - |
| PS-18-H | 17,9 | 20,1 | 17,8 | - | 16,7 | 17,7 | 16,5 | - | - |
| PS-19-H | 17,4 | 19,1 | 18,2 | - | 16,4 | 17,9 | 17,7 | - | - |
| PS-20-H | 39,8 | 47,7 | 38,7 | - | 23,6 | 29,3 | 25,1 | - | - |
| PS-21-H | 18,5 | 19,9 | 19,4 | - | 16,2 | 17,5 | 17,0 | - | - |
| PS-22-H | 18,0 | 20,4 | 18,7 | - | 16,4 | 16,6 | 18,0 | - | - |
| PS-23-H | 29,5 | 41,4 | 32,3 | - | 27,1 | 28,8 | 25,7 | - | - |
| PS-24-H | 23,5 | 30,6 | 27,3 | - | 19,3 | 21,8 | 20,8 | - | - |
| PS-25-H | 18,3 | 18,5 | 19,2 | - | 16,8 | 17,1 | 16,4 | - | - |
| PS-26-H | 32,6 | | 31,2 | - | 22,0 | 21,8 | 20,7 | - | - |



| Probeta | HX9 (66) | HT9 (66) | HC9 (66) | HA9 (66) | HL9 (66) | HX10 (80) | HT10 (80) | HC10 (80) | HA10 (80) | HL10 (80) |
|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| PS-01-H | 16,4 | 16,5 | 16,2 | | 14,7 | 14,5 | 17,4 | 16,2 | | 13,4 |
| PS-02-H | 13,4 | 17,5 | 15,9 | | | 13,1 | 15,7 | 14,3 | | |
| PS-03-H | 15,5 | 16,2 | 15,9 | 14,9 | 14,0 | 14,3 | 16,2 | 15,3 | 13,7 | 10,4 |
| PS-04-H | 15 | 15,4 | 14,4 | | | 13,1 | 14,0 | 13,2 | | |
| PS-05-H | 13,9 | 15,7 | 15,0 | 14,5 | 13,4 | 9,7 | 10,0 | 10,0 | 13,3 | 12,0 |
| PS-06-H | 18 | 18,1 | 17,3 | | | 14,8 | 16,3 | 15,6 | | |
| PS-07-H | 15,2 | 15,9 | 15,3 | 14,7 | 14,1 | 14,7 | 15,4 | 14,4 | 13,6 | 13,1 |
| PS-08-H | 13,8 | 14,9 | 13,8 | | | 12,4 | 15,2 | 13,2 | | |
| PS-09-H | 13,5 | 14,8 | 13,5 | 13,5 | 11,8 | 12,0 | 13,5 | 12,3 | 12,1 | 10,7 |
| PS-10-H | 18,7 | 18,5 | 17,7 | - | - | 15,3 | 16,7 | 16,9 | - | - |
| PS-11-H | 17,1 | 16,5 | 15,6 | - | - | 14,9 | 14,7 | 14,1 | - | - |
| PS-12-H | 14,5 | 17,0 | 16,1 | - | - | 13,2 | 15,6 | 14,7 | - | - |
| PS-13-H | 18,6 | 19,1 | 18,6 | - | - | 16,8 | 17,2 | 16,5 | - | - |
| PS-14-H | 15 | 16,7 | 16,0 | - | - | 14,9 | 15,5 | 15,0 | - | - |
| PS-15-H | 15,9 | 17,0 | 16,5 | - | - | 14,8 | 15,5 | 14,9 | - | - |
| PS-16-H | 17,5 | 18,1 | 16,9 | - | - | 15,4 | 16,3 | 15,2 | - | - |
| PS-17-H | 16,6 | 16,7 | 16,7 | - | - | 19,4 | 23,3 | 21,1 | - | - |
| PS-18-H | 15,2 | 15,0 | 15,7 | - | - | 14,5 | 14,9 | 14,0 | - | - |
| PS-19-H | 15,3 | 16,1 | 15,0 | - | - | 13,8 | 13,8 | 15,0 | - | - |
| PS-20-H | 16,4 | 21,3 | 19,5 | - | - | 17,0 | 18,3 | 17,5 | - | - |
| PS-21-H | 15,3 | 16,1 | 15,2 | - | - | 14,0 | 14,8 | 14,2 | - | - |
| PS-22-H | 14,8 | 16,6 | 15,3 | - | - | 13,8 | 15,2 | 13,9 | - | - |
| PS-23-H | 16,6 | 20,6 | 21,7 | - | - | 13,5 | 18,5 | 18,0 | - | - |
| PS-24-H | 16,9 | 19,3 | 18,5 | - | - | 16,0 | 16,3 | 17,4 | - | - |
| PS-25-H | 15,7 | 16,0 | 15,3 | - | - | 13,7 | 14,3 | 13,5 | - | - |
| PS-26-H | 18,2 | 19,0 | 16,2 | - | - | 15,5 | 16,9 | 16,2 | - | - |



| Probeta | HX11 (94) | HT11 (94) | HC11 (94) | HA11 (94) | HL11 (94) | HX12 (108) | HT12 (108) | HC12 (108) | HA12 (108) | HL12 (108) |
|---------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| PS-01-H | 14,4 | 15,9 | 14,9 | | 12,2 | 13,3 | 15,1 | 14,2 | | 11,5 |
| PS-02-H | 12,8 | 14,9 | 13,4 | | | 12,8 | 12,7 | 12,1 | | |
| PS-03-H | 13,8 | 15,2 | 14,3 | 12,7 | 12,1 | 12,2 | 14,5 | 13,6 | 12,3 | 11,7 |
| PS-04-H | 12,3 | 12,8 | 12,0 | | | 11,5 | 11,5 | 11,1 | | |
| PS-05-H | 12,1 | 13,8 | 11,1 | 12,2 | 11,0 | 11,0 | 13,2 | 11,6 | 11,8 | 10,6 |
| PS-06-H | 14,8 | 15,2 | 14,5 | | | 13,0 | 13,2 | 12,8 | | |
| PS-07-H | 14,0 | 14,3 | 13,3 | 12,5 | 12,1 | 13,5 | 13,7 | 11,6 | 12,0 | 11,6 |
| PS-08-H | 11,9 | 12,6 | 11,5 | | | 11,3 | 12,2 | 11,2 | | |
| PS-09-H | 11,1 | 12,4 | 11,5 | 11,1 | 10,0 | 10,9 | 12,0 | 10,8 | 10,8 | 9,6 |
| PS-10-H | 14,4 | 15,4 | 14,7 | - | - | 12,9 | 12,7 | 12,5 | - | - |
| PS-11-H | 14,6 | 13,7 | 12,9 | - | - | 12,5 | 13,2 | 11,9 | - | - |
| PS-12-H | 13,1 | 14,6 | 13,9 | - | - | 12,8 | 13,0 | 12,6 | - | - |
| PS-13-H | 15,5 | 15,9 | 16,0 | - | - | 13,6 | 13,3 | 13,2 | - | - |
| PS-14-H | 11,3 | 14,1 | 13,7 | - | - | 12,1 | 12,0 | 11,8 | - | - |
| PS-15-H | 12,1 | 14,2 | 13,7 | - | - | 12,0 | 13,7 | 13,1 | - | - |
| PS-16-H | 15,2 | 15,5 | 14,3 | - | - | 13,2 | 13,2 | 12,8 | - | - |
| PS-17-H | 18,7 | 20,3 | 20,4 | - | - | 13,8 | 13,6 | 13,5 | - | - |
| PS-18-H | 12,1 | 13,8 | 13,2 | - | - | 11,6 | 13,4 | 12,4 | - | - |
| PS-19-H | 12,2 | 13,6 | 12,5 | - | - | 12,0 | 11,9 | 11,5 | - | - |
| PS-20-H | 15,1 | 13,8 | 16,0 | - | - | 12,8 | 11,8 | 11,6 | - | - |
| PS-21-H | 13,5 | 13,9 | 13,0 | - | - | 12,4 | 12,4 | 12,0 | - | - |
| PS-22-H | 12,6 | 16,9 | 12,8 | - | - | 12,6 | 12,0 | 11,5 | - | - |
| PS-23-H | 16,8 | 15,5 | 16,6 | - | - | 12,5 | 12,6 | 12,5 | - | - |
| PS-24-H | 13,8 | 13,5 | 14,9 | - | - | 12,4 | 12,4 | 12,3 | - | - |
| PS-25-H | 13,1 | 13,5 | 12,7 | - | - | 11,9 | 12,5 | 11,9 | - | - |
| PS-26-H | 14,7 | 15,3 | 14,8 | - | - | 14,5 | 14,7 | 12,8 | - | - |



| Probeta | HX13 (123) | HT13 (123) | HC13 (123) | HA13 (123) | HL13 (123) | HX14 (137) | HT14 (137) | HC14 (137) | HA14 (137) | HL14 (137) |
|---------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| PS-01-H | 11,6 | 11,8 | 13,6 | | 10,3 | 10,1 | 10,1 | 10,2 | | 10,1 |
| PS-02-H | 11,6 | 12,1 | 11,6 | | | 10,7 | 11,2 | 11,3 | | |
| PS-03-H | 10,9 | 11,5 | 11,3 | 11,8 | 10,7 | 10,1 | 9,7 | 9,9 | 9,7 | 9,5 |
| PS-04-H | 12,0 | 12,0 | 11,2 | | | 11,4 | 11,5 | 10,5 | | |
| PS-05-H | 11,7 | 11,2 | 10,8 | 10,7 | 10,2 | 10 | 9,8 | 9,6 | 9,5 | 9,2 |
| PS-06-H | 11,6 | 11,6 | 11,4 | | | 11,5 | 11,4 | 11,3 | | |
| PS-07-H | 11,8 | 11,3 | 11,1 | 10,8 | 10,6 | 10 | 10,2 | 10,8 | 10,1 | 10,6 |
| PS-08-H | 11,4 | 11,4 | 10,7 | | | 11,3 | 11,3 | 11,7 | | |
| PS-09-H | 10,4 | 11,1 | 10,5 | 10,1 | 9,1 | 10,8 | 9,7 | 9,5 | 9,4 | 9,0 |
| PS-10-H | 13,3 | 11,6 | 11,5 | - | - | 12,2 | 10,5 | 10,1 | - | - |
| PS-11-H | 12,0 | 13,3 | 11,3 | - | - | 11,5 | 11,5 | 11,7 | - | - |
| PS-12-H | 11,4 | 11,6 | 11,4 | - | - | 11,5 | 11 | 11,5 | - | - |
| PS-13-H | 11,7 | 11,6 | 11,6 | - | - | 11,4 | 11,5 | 11,6 | - | - |
| PS-14-H | 11,7 | 11,5 | 11,5 | - | - | 10,5 | 10,4 | 10,2 | - | - |
| PS-15-H | 11,7 | 13 | 12,6 | - | - | 10,8 | 9,3 | 9,2 | - | - |
| PS-16-H | 11,6 | 11,7 | 11,5 | - | - | 11,7 | 11,4 | 11,3 | - | - |
| PS-17-H | 11,7 | 11,8 | 11,9 | - | - | 11,5 | 10,9 | 11,9 | - | - |
| PS-18-H | 11,4 | 11,6 | 11,2 | - | - | 10,2 | 10,6 | 10,5 | - | - |
| PS-19-H | 12,8 | 12,7 | 12,2 | - | - | 11,5 | 12,5 | 11,9 | - | - |
| PS-20-H | 10,8 | 11,3 | 11,2 | - | - | 10,1 | 10,4 | 10,3 | - | - |
| PS-21-H | 11,7 | 11,8 | 11,3 | - | - | 10,4 | 11,2 | 10,5 | - | - |
| PS-22-H | 12,0 | 13,1 | 12,1 | - | - | 11,6 | 12,3 | 11,5 | - | - |
| PS-23-H | 11,8 | 11,9 | 11,8 | - | - | 10,7 | 10,4 | 10,3 | - | - |
| PS-24-H | 13,6 | 14,1 | 13,4 | - | - | 12,0 | 11,3 | 11,6 | - | - |
| PS-25-H | 11,3 | 11,3 | 11,0 | - | - | 10,5 | 10,8 | 11,2 | - | - |
| PS-26-H | 12,0 | 12,0 | 12,0 | - | - | 10,9 | 11,3 | 11,2 | - | - |



| Probeta | HX15 (158) | HT15 (158) | HC15 (158) | HA15 (158) | HL15 (158) | HX16 (185) | HT16 (185) | HC16 (185) | HA16 (185) | HL16 (185) |
|---------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| PS-01-H | 12,2 | 12,5 | 11,7 | | 9,6 | 11,6 | 12,4 | 11,8 | | 9,5 |
| PS-02-H | 11,3 | 12,2 | 11,1 | | | 11,4 | 12,1 | 11,0 | | |
| PS-03-H | 12,0 | 12,3 | 11,3 | 10,3 | 9,8 | 12,0 | 12,3 | 11,2 | 10,3 | 9,7 |
| PS-04-H | 10,5 | 10,6 | 10,0 | | | 10,4 | 10,7 | 10,1 | | |
| PS-05-H | 12,0 | 11,5 | 10,0 | 9,9 | 9,0 | 12,2 | 11,7 | 9,9 | 9,9 | 8,9 |
| PS-06-H | 12,2 | 12,3 | 11,3 | | | 11,7 | 12,2 | 11,1 | | |
| PS-07-H | 11,7 | 11,9 | 11,1 | 10,2 | 9,9 | 12,0 | 12,0 | 11,0 | 10,3 | 10,0 |
| PS-08-H | 10,9 | 10,9 | 10,2 | | | 11,1 | 11,0 | 10,3 | | |
| PS-09-H | 10,6 | 10,6 | 9,9 | 9,0 | 8,1 | 10,3 | 10,7 | 10,1 | 9,4 | 8,4 |
| PS-10-H | 11,7 | 12,2 | 11,3 | - | - | 11,8 | 12,0 | 11,2 | - | - |
| PS-11-H | 12,4 | 11,3 | 10,5 | - | - | 11,8 | 11,3 | 10,5 | - | - |
| PS-12-H | 11,6 | 12,1 | 11,4 | - | - | 12,1 | 12,1 | 11,6 | - | - |
| PS-13-H | 13,6 | 12,6 | 12,0 | - | - | 13,2 | 12,3 | 11,7 | - | - |
| PS-14-H | 12,2 | 12,0 | 11,5 | - | - | 12,5 | 12,0 | 11,6 | - | - |
| PS-15-H | 12,3 | 12,1 | 11,5 | - | - | 12,6 | 12,3 | 11,6 | - | - |
| PS-16-H | 12,7 | 12,6 | 11,4 | - | - | 12,2 | 12,4 | 11,3 | - | - |
| PS-17-H | 13,9 | 14,8 | 14,4 | - | - | 14,3 | 14,2 | 14,0 | - | - |
| PS-18-H | 11,7 | 11,4 | 10,5 | - | - | 11,9 | 11,8 | 10,8 | - | - |
| PS-19-H | 11,3 | 11,5 | 10,5 | - | - | 11,4 | 11,3 | 10,3 | - | - |
| PS-20-H | 13,4 | 13,2 | 12,6 | - | - | 13,0 | 13,2 | 12,7 | - | - |
| PS-21-H | 11,6 | 11,5 | 10,6 | - | - | 11,7 | 11,5 | 10,7 | - | - |
| PS-22-H | 11,8 | 11,6 | 10,7 | - | - | 11,6 | 11,7 | 10,8 | - | - |
| PS-23-H | 13,2 | 13,7 | 13,0 | - | - | 13,4 | 13,4 | 12,8 | - | - |
| PS-24-H | 11,6 | 12,2 | 11,4 | - | - | 11,8 | 12,1 | 11,2 | - | - |
| PS-25-H | 11,1 | 11,3 | 10,5 | - | - | 11,2 | 11,5 | 10,5 | - | - |
| PS-26-H | 13,0 | 12,8 | 12,2 | - | - | 12,9 | 12,9 | 12,4 | - | - |



| Probeta | HX17 (213) | HT17 (213) | HC17 (213) | HA17 (213) | HL17 (213) | HX18 (290) | HT18 (290) | HC18 (290) | HA18 (290) | HL18 (290) |
|---------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| PS-01-H | 10,4 | 12,3 | 10,8 | | 9,1 | 9,6 | 9,8 | 9 | | 6 |
| PS-02-H | 10,2 | 11,2 | 10,0 | | | 8,8 | 9,3 | 8,4 | | |
| PS-03-H | 11,0 | 11,1 | 10,0 | 9,3 | 8,8 | 9,1 | 9,1 | 8,3 | 7,5 | 7,1 |
| PS-04-H | 9,8 | 9,7 | 9,0 | | | 8 | 7,7 | 7,3 | | |
| PS-05-H | 11,4 | 10,4 | 8,9 | 8,9 | 8,9 | 8,9 | 8,4 | 7,3 | 7 | 6 |
| PS-06-H | 11,3 | 11,3 | 10,1 | | | 9,2 | 9,3 | 7,9 | | |
| PS-07-H | 11,1 | 11,1 | 10,5 | 9,5 | 9,1 | 9 | 9,4 | 8,9 | 7,5 | 7,3 |
| PS-08-H | 10,5 | 10,1 | 9,4 | | | 7,8 | 8,4 | 7,9 | | |
| PS-09-H | 9,7 | 10,3 | 9,9 | 9,5 | 8,2 | 7,6 | 7,9 | 7,3 | 6,5 | 5,9 |
| PS-10-H | 10,9 | 11,0 | 10,2 | - | - | 8,9 | 8,8 | 8 | | |
| PS-11-H | 11,2 | 10,5 | 9,7 | - | - | 8,5 | 8,7 | 7,7 | | |
| PS-12-H | 10,9 | 11,2 | 10,4 | - | - | 9,1 | 9,3 | 8,5 | | |
| PS-13-H | 12,2 | 11,2 | 10,4 | - | - | 9,7 | 9,2 | 9,8 | | |
| PS-14-H | 11,2 | 10,9 | 10,5 | - | - | 9,2 | 8,8 | 8,3 | | |
| PS-15-H | 12,2 | 11,3 | 10,6 | - | - | 9,5 | 9,4 | 8,7 | | |
| PS-16-H | 11,6 | 11,5 | 10,6 | - | - | 9,7 | 9,5 | 8,4 | | |
| PS-17-H | 12,8 | 13,0 | 12,7 | - | - | 10,1 | 10,6 | 10,6 | | |
| PS-18-H | 10,4 | 10,6 | 9,8 | - | - | 9,2 | 9,6 | 8,5 | | |
| PS-19-H | 10,6 | 10,6 | 9,7 | - | - | 8,3 | 8,8 | 7,9 | | |
| PS-20-H | 11,9 | 12,2 | 11,6 | - | - | 9,8 | 9,6 | 9 | | |
| PS-21-H | 10,8 | 10,5 | 10,4 | - | - | 8,8 | 8,6 | 7,8 | | |
| PS-22-H | 10,7 | 11,2 | 10,0 | - | - | 8,8 | 9 | 8,4 | | |
| PS-23-H | 12,6 | 12,3 | 11,7 | - | - | 10 | 9,8 | 9,2 | | |
| PS-24-H | 10,7 | 11,1 | 10,2 | - | - | 8,6 | 9,1 | 9,1 | | |
| PS-25-H | 10,6 | 10,7 | 9,8 | - | - | 8,7 | 9 | 8,1 | | |
| PS-26-H | 11,9 | 11,9 | 11,3 | - | - | 9,7 | 10 | 9,1 | | |



| Probeta | HX19 (300) | HT19 (300) | HC19 (300) | HA19 (300) | HL19 (300) |
|---------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| PS-01-H | 9,6 | 8,6 | 7,9 | | 6,4 |
| PS-02-H | 8,1 | 9 | 8,1 | | |
| PS-03-H | 8,6 | 8,7 | 7,8 | 7,3 | 7 |
| PS-04-H | 7,7 | 7,5 | 7,1 | | |
| PS-05-H | 7,9 | 8,2 | 7,1 | 7,5 | 6,8 |
| PS-06-H | 8,9 | 9 | 7,9 | | |
| PS-07-H | 9,2 | 8,9 | 8,3 | 7,9 | 7,1 |
| PS-08-H | 7,9 | 8 | 7,4 | | |
| PS-09-H | 7,9 | 9,1 | 7,3 | 6,5 | 6,2 |
| PS-10-H | 8,7 | 8,6 | 7,8 | | |
| PS-11-H | 8,8 | 8,1 | 7,5 | | |
| PS-12-H | 9,1 | 9,1 | 8,2 | | |
| PS-13-H | 8,8 | 8,5 | 9,1 | | |
| PS-14-H | 9,2 | 8,6 | 7,9 | | |
| PS-15-H | 9 | 9,2 | 8,4 | | |
| PS-16-H | 9 | 9,2 | 8,4 | | |
| PS-17-H | 10,5 | 10,3 | 9,9 | | |
| PS-18-H | 8,7 | 8,5 | 7,8 | | |
| PS-19-H | 8,1 | 8,8 | 8 | | |
| PS-20-H | 9,6 | 9,3 | 8,6 | | |
| PS-21-H | 8,5 | 8,4 | 7,6 | | |
| PS-22-H | 8,5 | 8,8 | 7,9 | | |
| PS-23-H | 9,6 | 9,5 | 8,8 | | |
| PS-24-H | 7,9 | 8,3 | 8 | | |
| PS-25-H | 8,5 | 8,6 | 7,7 | | |
| PS-26-H | 9,6 | 9,4 | 8,8 | | |



Velocidad de propagación y de vibración

| Probeta | SS4 (20,5) | SI4 (20,5) | FS4 (20,5) | FI4 (20,5) | P4 (20,5) | SS5 (26) | SI5 (26) | FS5 (26) | FI5 (26) | P5 (26) |
|---------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| PS-01-H | 3886 | 3857 | 3886 | 3765 | 3492 | 4015 | 4052 | 4041 | 4089 | 3686 |
| PS-02-H | 4130 | 4253 | 4199 | 4259 | 3858 | 4221 | 4298 | 4270 | 4320 | 3917 |
| PS-03-H | 3986 | 4069 | 4039 | 4044 | 3610 | 4110 | 4172 | 4099 | 4193 | 3670 |
| PS-04-H | 4295 | 4336 | 4312 | 4336 | 3828 | 4372 | 4403 | 4372 | 4397 | 3935 |
| PS-05-H | 3938 | 4021 | 3911 | 3902 | 3643 | 4059 | 4143 | 4108 | 4148 | 3725 |
| PS-06-H | 4279 | 4198 | 4198 | 4261 | 3909 | 4438 | 4425 | 4369 | 4457 | 4008 |
| PS-07-H | 4676 | 4592 | 4757 | 4726 | 4339 | 4868 | 4764 | 4835 | 4745 | 4453 |
| PS-08-H | 4387 | 4549 | 4381 | 4425 | 4250 | 4432 | 4543 | 4464 | 4583 | 4318 |
| PS-09-H | 4454 | 4480 | 4506 | 4461 | 4110 | 4633 | 4559 | 4647 | 4640 | 4216 |
| PS-10-H | 4324 | 4264 | 4354 | 4513 | 3896 | 4461 | 4614 | 4493 | 4656 | 4013 |
| PS-11-H | 4130 | 3968 | 4130 | 4027 | 6936 | 4125 | 4037 | 4238 | 4120 | 3452 |
| PS-12-H | 4337 | 4202 | 4287 | 4238 | 3826 | 4480 | 4312 | 4454 | 4375 | 3933 |
| PS-13-H | 4494 | 4648 | 4414 | 4542 | 4064 | 4480 | 4605 | 4467 | 4584 | 4094 |
| PS-14-H | 3805 | 3738 | 3841 | 3738 | 3423 | 4075 | 4111 | 4181 | 4159 | 3744 |
| PS-15-H | 4406 | 4331 | 4513 | 4309 | 3869 | 4550 | 4471 | 4537 | 4495 | 4189 |
| PS-16-H | 4310 | 4254 | 4304 | 4227 | 3866 | 4361 | 4293 | 4361 | 4271 | 3899 |
| PS-17-H | 4452 | 4371 | 4435 | 4423 | 3998 | 4464 | 4394 | 4447 | 4429 | 4024 |
| PS-18-H | 4448 | 4417 | 4573 | 4461 | 4018 | 4621 | 4481 | 4621 | 4553 | 4154 |
| PS-19-H | 4549 | 4617 | 4569 | 4638 | 4200 | 4659 | 4716 | 4645 | 4716 | 4250 |
| PS-20-H | 3782 | 3756 | 3791 | 3734 | 3243 | 3998 | 3929 | 4012 | 3968 | 3508 |
| PS-21-H | 4245 | 4633 | 4352 | 4585 | 3943 | 4402 | 4668 | 4433 | 4668 | 4011 |
| PS-22-H | 4496 | 4542 | 4548 | 4542 | 3997 | 4588 | 4615 | 4622 | 4588 | 4060 |
| PS-23-H | 3667 | 3655 | 3699 | 3683 | 3315 | 3889 | 3839 | 3930 | 3902 | 3556 |
| PS-24-H | 3804 | 3662 | 3851 | 3813 | 3379 | 3954 | 3900 | 3945 | 3918 | 3550 |
| PS-25-H | 4348 | 4288 | 4435 | 4379 | 3937 | 4586 | 4480 | 4552 | 4473 | 4011 |
| PS-26-H | 3536 | 3590 | 3563 | 3622 | 3210 | 3691 | 3724 | 3699 | 3780 | 3421 |



| Probeta | SS6 (32) | SI6 (32) | FS6 (32) | FI6 (32) | P6 (32) | SS7 (42) | SI7 (42) | FS7 (42) | FI7 (42) | P7 (42) |
|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| PS-01-H | 4159 | 4435 | 4278 | 4410 | 3894 | 4416 | 4564 | 4435 | 4591 | 3919 |
| PS-02-H | 4298 | 4425 | 4354 | 4419 | 3996 | 4366 | 4455 | 4419 | 4455 | 4043 |
| PS-03-H | 4177 | 4258 | 4183 | 4314 | 3762 | 4209 | 4331 | 4231 | 4342 | 3802 |
| PS-04-H | 4472 | 4529 | 4478 | 4523 | 4023 | 4516 | 4549 | 4536 | 4562 | 4042 |
| PS-05-H | 4158 | 4203 | 4229 | 4261 | 3807 | 4183 | 4209 | 4282 | 4314 | 3855 |
| PS-06-H | 4509 | 4562 | 4483 | 4575 | 4101 | 4575 | 4589 | 4562 | 4651 | 4150 |
| PS-07-H | 5011 | 4908 | 4956 | 4848 | 4546 | 5018 | 4888 | 4990 | 4901 | 4596 |
| PS-08-H | 4529 | 4660 | 4556 | 4695 | 4411 | 4604 | 4709 | 4611 | 4731 | 4466 |
| PS-09-H | 4761 | 4754 | 4754 | 4754 | 4315 | 4790 | 4790 | 4798 | 4813 | 4365 |
| PS-10-H | 4601 | 4816 | 4594 | 4808 | 4124 | 4594 | 4884 | 4677 | 4916 | 4198 |
| PS-11-H | 4189 | 4109 | 4335 | 4194 | 3678 | 4249 | 4162 | 4370 | 4244 | 3763 |
| PS-12-H | 4577 | 4440 | 4549 | 4454 | 4004 | 4641 | 4528 | 4634 | 4508 | 4070 |
| PS-13-H | 4528 | 4641 | 4549 | 4677 | 4154 | 4641 | 4707 | 4556 | 4714 | 4100 |
| PS-14-H | 4281 | 4287 | 4393 | 4369 | 3879 | 4310 | 4345 | 4460 | 4460 | 3962 |
| PS-15-H | 4677 | 4651 | 4645 | 4658 | 4382 | 4757 | 4691 | 4737 | 4764 | 4469 |
| PS-16-H | 4431 | 4350 | 4443 | 4361 | 3985 | 4467 | 4413 | 4510 | 4402 | 4032 |
| PS-17-H | 4513 | 4435 | 4507 | 4495 | 4084 | 4550 | 4371 | 4538 | 4501 | 4124 |
| PS-18-H | 4712 | 4669 | 4733 | 4669 | 4254 | 4748 | 4690 | 4777 | 4705 | 4297 |
| PS-19-H | 4688 | 4753 | 4731 | 4820 | 4323 | 4724 | 4805 | 4767 | 4835 | 4373 |
| PS-20-H | 4330 | 4267 | 4330 | 4278 | 3824 | 4588 | 4549 | 4595 | 4543 | 4173 |
| PS-21-H | 4452 | 4806 | 4544 | 4769 | 4097 | 4498 | 4836 | 4598 | 4836 | 4165 |
| PS-22-H | 4575 | 4677 | 4677 | 4677 | 4117 | 4670 | 4704 | 4726 | 4747 | 4173 |
| PS-23-H | 4128 | 4149 | 4185 | 4159 | 3823 | 4331 | 4320 | 4440 | 4405 | 4078 |
| PS-24-H | 4302 | 4270 | 4275 | 4207 | 3803 | 4447 | 4357 | 4419 | 4340 | 3967 |
| PS-25-H | 4683 | 4579 | 4641 | 4572 | 4117 | 4711 | 4613 | 4690 | 4648 | 4173 |
| PS-26-H | 3957 | 4039 | 3971 | 4054 | 3672 | 4292 | 4343 | 4264 | 4325 | 3935 |



| Probeta | SS8 (54) | SI8 (54) | FS8 (54) | FI8 (54) | P8 (54) | SS9 (66) | SI9 (66) | FS9 (66) | FI9 (66) | P9 (66) |
|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| PS-01-H | 4492 | 4743 | 4577 | 4758 | 4057 | 4564 | 4801 | 4652 | 4831 | 4151 |
| PS-02-H | 4431 | 4528 | 4479 | 4534 | 4122 | 4491 | 4560 | 4560 | 4611 | 4187 |
| PS-03-H | 4286 | 4412 | 4286 | 4412 | 3868 | 4280 | 4424 | 4354 | 4465 | 3947 |
| PS-04-H | 4596 | 4616 | 4582 | 4629 | 4149 | 4678 | 4713 | 4671 | 4713 | 4244 |
| PS-05-H | 4250 | 4271 | 4358 | 4325 | 3924 | 4235 | 4271 | 4409 | 4455 | 3993 |
| PS-06-H | 4616 | 4679 | 4630 | 4729 | 4225 | 4700 | 4721 | 4714 | 4802 | 4312 |
| PS-07-H | 5083 | 4969 | 5061 | 4956 | 4667 | 5068 | 4990 | 5126 | 5061 | 4745 |
| PS-08-H | 4667 | 4738 | 4688 | 4813 | 4528 | 4738 | 4828 | 4790 | 4881 | 4614 |
| PS-09-H | 4881 | 4896 | 4873 | 4881 | 4427 | 4881 | 4919 | 4935 | 4927 | 4508 |
| PS-10-H | 4663 | 4947 | 4786 | 4987 | 4285 | 4713 | 5011 | 4839 | 5061 | 4371 |
| PS-11-H | 4289 | 4222 | 4448 | 4306 | 3620 | 4388 | 4289 | 4516 | 4388 | 3704 |
| PS-12-H | 4707 | 4556 | 4678 | 4584 | 4129 | 4798 | 4627 | 4760 | 4678 | 4189 |
| PS-13-H | 4626 | 4722 | 4641 | 4767 | 4166 | 4677 | 4805 | 4752 | 4876 | 4231 |
| PS-14-H | 4387 | 4387 | 4548 | 4568 | 4052 | 4441 | 4523 | 4627 | 4600 | 4136 |
| PS-15-H | 4854 | 4812 | 4847 | 4883 | 4576 | 4941 | 4862 | 4948 | 4955 | 4649 |
| PS-16-H | 4547 | 4479 | 4553 | 4461 | 4098 | 4623 | 4547 | 4636 | 4553 | 4177 |
| PS-17-H | 4588 | 4538 | 4600 | 4562 | 4191 | 4652 | 4588 | 4691 | 4645 | 4251 |
| PS-18-H | 4829 | 4748 | 4852 | 4777 | 4378 | 4807 | 4770 | 4867 | 4836 | 4446 |
| PS-19-H | 4797 | 4889 | 4820 | 4896 | 4446 | 4873 | 4960 | 4904 | 5000 | 4508 |
| PS-20-H | 4850 | 4778 | 4872 | 4785 | 4399 | 4969 | 4872 | 4985 | 4931 | 4541 |
| PS-21-H | 4619 | 4874 | 4682 | 4928 | 4258 | 4654 | 4920 | 4754 | 4984 | 4345 |
| PS-22-H | 4719 | 4790 | 4798 | 4812 | 4249 | 4726 | 4820 | 4864 | 4910 | 4325 |
| PS-23-H | 4506 | 4488 | 4599 | 4593 | 4178 | 4624 | 4696 | 4762 | 4749 | 4319 |
| PS-24-H | 4584 | 4500 | 4591 | 4476 | 4111 | 4685 | 4578 | 4698 | 4634 | 4213 |
| PS-25-H | 4755 | 4676 | 4784 | 4697 | 4253 | 4844 | 4777 | 4874 | 4806 | 4328 |
| PS-26-H | 4442 | 4472 | 4442 | 4509 | 4094 | 4534 | 4578 | 4578 | 4649 | 4225 |



| Probeta | SS10 (80) | SI10 (80) | FS10 (80) | FI10 (80) | P10 (80) | SS11 (94) | SI11 (94) | FS11 (94) | FI11 (94) | P11 (94) |
|---------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| PS-01-H | 4618 | 4876 | 4729 | 4891 | 4182 | 4722 | 4868 | 4750 | 4906 | 4226 |
| PS-02-H | 4553 | 4604 | 4566 | 4624 | 4214 | 4516 | 4611 | 4591 | 4670 | 4240 |
| PS-03-H | 4406 | 4465 | 4388 | 4490 | 3960 | 4388 | 4508 | 4400 | 4502 | 4006 |
| PS-04-H | 4685 | 4609 | 4699 | 4734 | 4256 | 4706 | 4762 | 4706 | 4748 | 4281 |
| PS-05-H | 4397 | 4392 | 4443 | 4443 | 4020 | 4331 | 4358 | 4466 | 4466 | 4054 |
| PS-06-H | 4743 | 4758 | 4729 | 4802 | 4343 | 4679 | 4693 | 4729 | 4824 | 4368 |
| PS-07-H | 5179 | 5040 | 5156 | 5075 | 4774 | 5209 | 5075 | 5194 | 5112 | 4810 |
| PS-08-H | 4775 | 4881 | 4775 | 4881 | 4632 | 4790 | 4858 | 4783 | 4912 | 4669 |
| PS-09-H | 4951 | 4998 | 4966 | 4966 | 4533 | 4990 | 4982 | 4998 | 4966 | 4558 |
| PS-10-H | 4727 | 5077 | 4846 | 5069 | 4402 | 4713 | 5044 | 4869 | 5111 | 4439 |
| PS-11-H | 4255 | 4244 | 4510 | 4399 | 3937 | 4370 | 4376 | 4535 | 4388 | 3957 |
| PS-12-H | 4814 | 4663 | 4791 | 4685 | 4219 | 4775 | 4577 | 4783 | 4707 | 4236 |
| PS-13-H | 4684 | 4790 | 4729 | 4828 | 4369 | 4707 | 4790 | 4767 | 4876 | 4291 |
| PS-14-H | 4491 | 4764 | 4614 | 4627 | 4161 | 4555 | 4535 | 4607 | 4633 | 4200 |
| PS-15-H | 5000 | 4948 | 5000 | 4985 | 4696 | 5008 | 4919 | 5000 | 4993 | 4722 |
| PS-16-H | 4503 | 4553 | 4662 | 4578 | 4204 | 4566 | 4528 | 4662 | 4591 | 4237 |
| PS-17-H | 4718 | 4519 | 4698 | 4658 | 4291 | 4691 | 4652 | 4731 | 4685 | 4330 |
| PS-18-H | 4913 | 4874 | 4944 | 4882 | 4465 | 4952 | 4852 | 4929 | 4897 | 4508 |
| PS-19-H | 4904 | 4992 | 4912 | 4968 | 4539 | 4896 | 4992 | 4928 | 5000 | 4569 |
| PS-20-H | 5063 | 5000 | 5087 | 5047 | 4612 | 5111 | 5039 | 5119 | 5063 | 4671 |
| PS-21-H | 4769 | 4952 | 4783 | 4992 | 4375 | 4696 | 4992 | 4791 | 4984 | 4406 |
| PS-22-H | 4849 | 4887 | 4925 | 4933 | 4350 | 4827 | 4917 | 4925 | 4925 | 4388 |
| PS-23-H | 4749 | 4749 | 4803 | 4790 | 4386 | 4749 | 4729 | 4817 | 4810 | 4453 |
| PS-24-H | 4743 | 4622 | 4770 | 4653 | 4261 | 4777 | 4647 | 4783 | 4685 | 4316 |
| PS-25-H | 4806 | 4777 | 4882 | 4814 | 4365 | 4844 | 4806 | 4867 | 4821 | 4396 |
| PS-26-H | 4578 | 4591 | 4616 | 4688 | 4272 | 4552 | 4610 | 4636 | 4695 | 4311 |



| Probeta | SS12 (108) | SI12 (108) | FS12 (108) | FI12 (108) | P12 (108) | SS13 (123) | SI13 (123) | FS13 (123) | FI13 (123) | P13 (123) |
|---------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|
| PS-01-H | 4701 | 4929 | 4750 | 4929 | 4239 | 4584 | 4652 | 4743 | 4891 | 4258 |
| PS-02-H | 4491 | 4630 | 4585 | 4643 | 4260 | 4510 | 4650 | 4572 | 4637 | 4260 |
| PS-03-H | 4418 | 4533 | 4424 | 4502 | 4013 | 4382 | 4496 | 4400 | 4508 | 4019 |
| PS-04-H | 4720 | 4748 | 4720 | 4770 | 4382 | 4713 | 4748 | 4720 | 4770 | 4300 |
| PS-05-H | 4381 | 4397 | 4472 | 4466 | 4068 | 4320 | 4320 | 4472 | 4478 | 4082 |
| PS-06-H | 4672 | 4765 | 4750 | 4780 | 4386 | 4758 | 4824 | 4729 | 4832 | 4386 |
| PS-07-H | 5194 | 5112 | 5194 | 5104 | 4824 | 5194 | 5097 | 5194 | 5104 | 4817 |
| PS-08-H | 4805 | 4889 | 4813 | 4920 | 4682 | 4805 | 4881 | 4798 | 4904 | 4675 |
| PS-09-H | 5006 | 4990 | 4998 | 4982 | 4558 | 4982 | 4990 | 4982 | 4974 | 4564 |
| PS-10-H | 4749 | 5069 | 4877 | 5077 | 4445 | 4771 | 5111 | 4892 | 5086 | 4458 |
| PS-11-H | 4370 | 4340 | 4548 | 4436 | 3963 | 4317 | 4306 | 4516 | 4370 | 3989 |
| PS-12-H | 4806 | 4620 | 4798 | 4700 | 4260 | 4837 | 4700 | 4791 | 4707 | 4266 |
| PS-13-H | 4744 | 4821 | 4782 | 4900 | 4416 | 4790 | 4884 | 4805 | 4900 | 4434 |
| PS-14-H | 4429 | 4516 | 4627 | 4647 | 4213 | 4510 | 4491 | 4627 | 4633 | 4213 |
| PS-15-H | 5023 | 4933 | 5023 | 5030 | 4749 | 5023 | 4883 | 5023 | 5000 | 4756 |
| PS-16-H | 4629 | 4597 | 4688 | 4616 | 4257 | 4655 | 4629 | 4708 | 4629 | 4263 |
| PS-17-H | 4779 | 4665 | 4758 | 4711 | 4357 | 4806 | 4704 | 4758 | 4718 | 4377 |
| PS-18-H | 4952 | 4905 | 4929 | 4882 | 4527 | 4913 | 4897 | 4921 | 4905 | 4527 |
| PS-19-H | 4912 | 5033 | 4952 | 5000 | 4582 | 4928 | 5041 | 4944 | 5016 | 4588 |
| PS-20-H | 5119 | 5039 | 5127 | 5103 | 4703 | 5063 | 5031 | 5127 | 5103 | 4716 |
| PS-21-H | 4696 | 5024 | 4791 | 5024 | 4406 | 4739 | 5008 | 4791 | 5024 | 4419 |
| PS-22-H | 4776 | 4910 | 4925 | 4940 | 4413 | 4827 | 4887 | 4925 | 4940 | 4413 |
| PS-23-H | 4797 | 4762 | 4852 | 4866 | 4486 | 4831 | 4824 | 4909 | 4895 | 4513 |
| PS-24-H | 4783 | 4653 | 4790 | 4704 | 4337 | 4790 | 4672 | 4824 | 4711 | 4350 |
| PS-25-H | 4851 | 4821 | 4897 | 4829 | 4396 | 4897 | 4836 | 4905 | 4836 | 4390 |
| PS-26-H | 4584 | 4623 | 4662 | 4736 | 4344 | 4603 | 4636 | 4675 | 4715 | 4351 |



| Probeta | SS14 (137) | SI14 (137) | FS14 (137) | FI14 (137) | P14 (137) | SS15 (158) | SI15 (158) | FS15 (158) | FI15 (158) | P15 (158) |
|---------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|
| PS-01-H | 4715 | 4861 | 4715 | 4906 | 4264 | 4597 | 4779 | 4772 | 4883 | 4289 |
| PS-02-H | 4566 | 4624 | 4579 | 4663 | 4266 | 4591 | 4670 | 4585 | 4656 | 4286 |
| PS-03-H | 4400 | 4527 | 4400 | 4502 | 4033 | 4400 | 4496 | 4424 | 4514 | 4039 |
| PS-04-H | 4720 | 4720 | 4678 | 4748 | 4281 | 4692 | 4784 | 4699 | 4741 | 4294 |
| PS-05-H | 4375 | 4386 | 4455 | 4443 | 4089 | 4369 | 4353 | 4460 | 4449 | 4095 |
| PS-06-H | 4772 | 4787 | 4721 | 4854 | 4392 | 4758 | 4839 | 4714 | 4809 | 4417 |
| PS-07-H | 5232 | 5126 | 5164 | 5068 | 4824 | 5224 | 5104 | 5201 | 5104 | 4852 |
| PS-08-H | 4805 | 4912 | 4790 | 4897 | 4682 | 4813 | 4904 | 4798 | 4912 | 4669 |
| PS-09-H | 5015 | 5015 | 4935 | 4966 | 4564 | 5015 | 5015 | 4959 | 4966 | 4583 |
| PS-10-H | 4727 | 5052 | 4900 | 5119 | 4470 | 4816 | 5086 | 4900 | 5086 | 4482 |
| PS-11-H | 4370 | 4376 | 4529 | 4417 | 3983 | 4454 | 4411 | 4529 | 4417 | 3996 |
| PS-12-H | 4822 | 4700 | 4783 | 4678 | 4254 | 4830 | 4678 | 4768 | 4722 | 4290 |
| PS-13-H | 4782 | 4852 | 4782 | 4876 | 4452 | 4821 | 4900 | 4797 | 4908 | 4482 |
| PS-14-H | 4504 | 4516 | 4594 | 4633 | 4213 | 4574 | 4510 | 4587 | 4614 | 4213 |
| PS-15-H | 5030 | 4978 | 5000 | 5000 | 4762 | 5045 | 4978 | 5023 | 5015 | 4769 |
| PS-16-H | 4623 | 4629 | 4688 | 4616 | 4270 | 4669 | 4675 | 4708 | 4629 | 4290 |
| PS-17-H | 4738 | 4793 | 4758 | 4718 | 4390 | 4827 | 4738 | 4751 | 4731 | 4424 |
| PS-18-H | 4944 | 4921 | 4921 | 4882 | 4527 | 4936 | 4929 | 4944 | 4867 | 4564 |
| PS-19-H | 4960 | 5025 | 4944 | 5016 | 4594 | 4936 | 5033 | 4952 | 5016 | 4613 |
| PS-20-H | 5143 | 5071 | 5127 | 5103 | 4735 | 5111 | 5055 | 5143 | 5119 | 4735 |
| PS-21-H | 4682 | 5024 | 4761 | 4984 | 4419 | 4769 | 5008 | 4783 | 4968 | 4425 |
| PS-22-H | 4820 | 4933 | 4925 | 4948 | 4432 | 4887 | 4948 | 4933 | 4940 | 4438 |
| PS-23-H | 4810 | 4797 | 4880 | 4873 | 4526 | 4838 | 4817 | 4873 | 4895 | 4553 |
| PS-24-H | 4797 | 4679 | 4817 | 4743 | 4364 | 4803 | 4672 | 4783 | 4711 | 4378 |
| PS-25-H | 4905 | 4844 | 4897 | 4829 | 4390 | 4882 | 4806 | 4897 | 4821 | 4421 |
| PS-26-H | 4597 | 4669 | 4682 | 4715 | 4357 | 4655 | 4682 | 4675 | 4709 | 4364 |



| Probeta | SS17 (213) | SI17 (213) | FS17 (213) | FI17 (213) | P17 (213) | SS18 (290) | SI18 (290) | FS18 (290) | FI18 (290) | P18 (290) |
|---------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|
| PS-01-H | 4645 | 4831 | 4743 | 4876 | 4302 | 5073 | 4899 | 5048 | 4906 | 4402 |
| PS-02-H | 4598 | 4637 | 4611 | 4676 | 4299 | 4696 | 4764 | 4757 | 4806 | 4372 |
| PS-03-H | 4377 | 4502 | 4435 | 4502 | 4066 | 4545 | 4648 | 4472 | 4571 | 4145 |
| PS-04-H | 4748 | 4734 | 4706 | 4755 | 4306 | 4784 | 4806 | 4836 | 4873 | 4388 |
| PS-05-H | 4455 | 4420 | 4466 | 4501 | 4116 | 4573 | 4610 | 4561 | 4513 | 4212 |
| PS-06-H | 4758 | 4870 | 4736 | 4854 | 4423 | 4900 | 4955 | 4885 | 4971 | 4523 |
| PS-07-H | 5209 | 5194 | 5209 | 5141 | 4867 | 5373 | 5263 | 5302 | 5201 | 4960 |
| PS-08-H | 4805 | 4881 | 4805 | 4904 | 4700 | 5016 | 5024 | 4936 | 5033 | 4774 |
| PS-09-H | 4881 | 4865 | 4974 | 4998 | 4583 | 5122 | 5122 | 5064 | 5072 | 4676 |
| PS-10-H | 4816 | 5119 | 4884 | 5111 | 4488 | 4971 | 5232 | 5086 | 5277 | 4581 |
| PS-11-H | 4411 | 4352 | 4529 | 4417 | 4022 | 4554 | 4503 | 4734 | 4586 | 4080 |
| PS-12-H | 4806 | 4670 | 4806 | 4745 | 4302 | 4942 | 4791 | 4917 | 4837 | 4379 |
| PS-13-H | 4844 | 4924 | 4828 | 4916 | 4398 | 4973 | 5066 | 4973 | 5092 | 4607 |
| PS-14-H | 4411 | 4287 | 4594 | 4633 | 4245 | 4574 | 4729 | 4778 | 4778 | 4322 |
| PS-15-H | 5099 | 4963 | 5053 | 5045 | 4796 | 5131 | 5147 | 5147 | 5139 | 4889 |
| PS-16-H | 4702 | 4688 | 4708 | 4655 | 4310 | 4783 | 4797 | 4839 | 4776 | 4402 |
| PS-17-H | 4884 | 4855 | 4820 | 4793 | 4450 | 4957 | 4877 | 4964 | 4920 | 4550 |
| PS-18-H | 4936 | 4913 | 4952 | 4921 | 4564 | 5132 | 5049 | 5065 | 5024 | 4645 |
| PS-19-H | 4866 | 5058 | 4960 | 5041 | 4619 | 5000 | 5049 | 5074 | 5177 | 4717 |
| PS-20-H | 5127 | 5008 | 5127 | 5143 | 4761 | 5295 | 5304 | 5227 | 5261 | 4845 |
| PS-21-H | 4647 | 4960 | 4798 | 5016 | 4443 | 4905 | 5133 | 4984 | 5193 | 4437 |
| PS-22-H | 4849 | 4987 | 4910 | 4979 | 4470 | 5092 | 5019 | 5076 | 5084 | 4551 |
| PS-23-H | 4960 | 4790 | 4931 | 4924 | 4580 | 5042 | 5050 | 5057 | 5042 | 4687 |
| PS-24-H | 4837 | 4640 | 4817 | 4730 | 4405 | 4942 | 4971 | 4907 | 4978 | 4494 |
| PS-25-H | 4928 | 4851 | 4897 | 4799 | 4421 | 5041 | 4936 | 5041 | 4960 | 4520 |
| PS-26-H | 4636 | 4642 | 4688 | 4736 | 4390 | 4812 | 4840 | 4833 | 4919 | 4476 |



Masa de las probetas

| Probeta | M4 (20,5) | M5 (26) | M6 (32) | M7 (42) | M8 (54) | M9 (66) | M10 (80) |
|---------|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|
| PS-01-H | 29,16 | 26,90 | 24,88 | 24,02 | 23,48 | 23,14 | 22,72 |
| PS-02-H | 23,16 | 22,60 | 22,18 | 22,02 | 21,42 | 21,22 | 21,04 |
| PS-03-H | 23,02 | 22,74 | 22,56 | 22,12 | 21,86 | 20,00 | 21,44 |
| PS-04-H | 18,94 | 18,32 | 17,90 | 17,72 | 17,36 | 17,12 | 16,80 |
| PS-05-H | 24,42 | 24,30 | 23,58 | 23,56 | 23,04 | 22,78 | 22,52 |
| PS-06-H | 24,88 | 23,60 | 22,96 | 22,96 | 22,30 | 22,12 | 21,64 |
| PS-07-H | 25,58 | 24,84 | 24,42 | 23,98 | 23,70 | 23,46 | 23,08 |
| PS-08-H | 18,00 | 17,90 | 17,52 | 17,34 | 16,92 | 16,78 | 16,54 |
| PS-09-H | 19,20 | 18,60 | 18,12 | 17,90 | 17,50 | 17,34 | 17,02 |
| PS-10-H | 23,94 | 22,30 | 21,66 | 21,22 | 20,84 | 20,56 | 20,26 |
| PS-11-H | 23,88 | 22,80 | 22,20 | 21,92 | 21,44 | 21,26 | 20,90 |
| PS-12-H | 21,64 | 20,76 | 20,42 | 20,06 | 19,66 | 19,60 | 19,24 |
| PS-13-H | 23,26 | 22,70 | 22,62 | 22,46 | 21,94 | 21,54 | 21,42 |
| PS-14-H | 27,50 | 22,66 | 21,66 | 21,06 | 20,52 | 20,18 | 19,90 |
| PS-15-H | 29,28 | 24,84 | 23,04 | 22,20 | 21,76 | 21,46 | 21,02 |
| PS-16-H | 23,48 | 22,00 | 22,78 | 22,64 | 22,20 | 22,06 | 21,60 |
| PS-17-H | 25,22 | 25,06 | 24,62 | 24,42 | 23,84 | 23,58 | 23,26 |
| PS-18-H | 22,58 | 21,66 | 21,18 | 20,98 | 20,52 | 20,14 | 19,96 |
| PS-19-H | 21,50 | 21,04 | 20,92 | 20,56 | 20,40 | 20,06 | 19,78 |
| PS-20-H | 39,08 | 32,92 | 27,40 | 23,34 | 21,92 | 21,26 | 20,76 |
| PS-21-H | 20,66 | 20,12 | 19,60 | 19,30 | 18,88 | 18,70 | 18,34 |
| PS-22-H | 22,80 | 22,20 | 22,18 | 20,00 | 21,30 | 21,04 | 20,72 |
| PS-23-H | 38,24 | 33,04 | 28,54 | 25,50 | 24,24 | 23,52 | 22,90 |
| PS-24-H | 35,14 | 31,52 | 27,04 | 25,14 | 24,22 | 23,84 | 23,40 |
| PS-25-H | 20,66 | 19,76 | 19,30 | 19,16 | 18,72 | 18,40 | 18,32 |
| PS-26-H | 37,40 | 31,66 | 26,80 | 23,24 | 22,04 | 21,60 | 21,22 |



| Probeta | M11 (94) | M12 (108) | M13 (123) | M14 (137) | M15 (158) | M17 (213) | M18 (290) |
|---------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| PS-01-H | 22,72 | 22,60 | 22,68 | 22,42 | 22,44 | 22,04 | 21,8 |
| PS-02-H | 20,88 | 20,90 | 20,84 | 20,74 | 20,78 | 20,38 | 20,0 |
| PS-03-H | 21,36 | 21,18 | 20,96 | 21,08 | 20,98 | 21,10 | 20,6 |
| PS-04-H | 16,76 | 16,84 | 16,72 | 16,58 | 16,78 | 16,54 | 16,2 |
| PS-05-H | 22,68 | 22,40 | 22,42 | 22,12 | 22,12 | 22,80 | 22,2 |
| PS-06-H | 21,76 | 21,66 | 21,58 | 21,42 | 21,46 | 21,16 | 20,7 |
| PS-07-H | 22,90 | 22,76 | 22,96 | 22,68 | 22,74 | 22,14 | 21,8 |
| PS-08-H | 16,70 | 16,32 | 16,36 | 16,30 | 16,44 | 16,24 | 16,0 |
| PS-09-H | 17,06 | 17,04 | 16,96 | 16,9 | 16,88 | 17,20 | 16,7 |
| PS-10-H | 20,24 | 20,08 | 20,08 | 19,96 | 19,94 | 19,70 | 19,1 |
| PS-11-H | 20,96 | 20,76 | 20,8 | 20,62 | 20,6 | 20,36 | 19,8 |
| PS-12-H | 19,32 | 19,22 | 19,16 | 19,10 | 19,18 | 18,74 | 18,3 |
| PS-13-H | 21,30 | 21,08 | 21,04 | 21,04 | 20,88 | 20,58 | 20,2 |
| PS-14-H | 19,94 | 19,80 | 19,86 | 19,58 | 19,78 | 19,82 | 19,5 |
| PS-15-H | 21,08 | 20,88 | 20,88 | 20,7 | 20,62 | 22,84 | 22,6 |
| PS-16-H | 21,54 | 21,52 | 21,44 | 21,48 | 21,38 | 21,14 | 20,5 |
| PS-17-H | 22,94 | 22,90 | 22,76 | 22,76 | 22,46 | 22,20 | 21,5 |
| PS-18-H | 19,96 | 19,84 | 19,76 | 19,68 | 19,54 | 19,54 | 19,1 |
| PS-19-H | 19,72 | 19,68 | 19,58 | 19,62 | 19,38 | 19,36 | 19,0 |
| PS-20-H | 20,50 | 20,58 | 20,34 | 20,40 | 20,36 | 19,96 | 19,7 |
| PS-21-H | 18,42 | 18,24 | 18,38 | 18,24 | 18,28 | 18,00 | 17,8 |
| PS-22-H | 20,64 | 20,56 | 20,44 | 20,32 | 20,34 | 20,18 | 19,9 |
| PS-23-H | 22,74 | 22,48 | 22,38 | 22,10 | 22,2 | 22,34 | 22,1 |
| PS-24-H | 23,18 | 22,98 | 23,1 | 22,66 | 22,74 | 23,46 | 23,2 |
| PS-25-H | 18,34 | 18,14 | 18,04 | 17,92 | 18,08 | 17,80 | 17,5 |
| PS-26-H | 21,04 | 20,84 | 20,80 | 20,60 | 20,72 | 20,28 | 19,9 |



Tabla de valores medios

| | D | HX | HT | HC | HA | HL | SS | SI | SM | FS | FI | FM | P | M |
|-----|------|------|------|------|------|------|-------|------|-------|------|------|------|------|-------|
| D0 | 0 | 49,3 | | | | | | | | | | | | |
| D1 | 7 | 35,7 | | | | | | | | | | | | |
| D2 | 14 | 42,8 | | | | | | | | | | | | |
| D3 | 18 | 40,8 | | | | | | | | | | | | |
| D4 | 20,5 | 35,5 | 44,5 | 41,3 | 24,0 | | 41996 | 4203 | 4201 | 4225 | 4217 | 4221 | 3929 | 25,49 |
| D5 | 26 | 31,9 | 35,0 | 31,5 | 19,9 | | 4328 | 432, | 4328 | 4340 | 4355 | 4347 | 3915 | 23,72 |
| D6 | 32 | 25,0 | 28,7 | 26,0 | 18,6 | | 4450 | 4487 | 4468 | 4476 | 4501 | 4488 | 4045 | 22,54 |
| D7 | 42 | 21,4 | 24,7 | 22,5 | 17,7 | | 4535 | 4553 | 4544 | 4562 | 4587 | 4574 | 4127 | 21,72 |
| D8 | 54 | 18,3 | 19,9 | 19,0 | 15,9 | 16,9 | 4618 | 4643 | 4630 | 4657 | 4678 | 4667 | 4210 | 21,23 |
| D9 | 66 | 15,9 | 17,1 | 16,3 | 14,4 | 13,6 | 4676 | 4709 | 4692 | 4741 | 4769 | 4755 | 4295 | 20,88 |
| D10 | 80 | 14,4 | 15,8 | 15,1 | 13,2 | 11,9 | 4726 | 4754 | 4740 | 4770 | 4789 | 4779 | 4339 | 20,61 |
| D11 | 94 | 13,7 | 14,6 | 13,9 | 12,1 | 11,5 | 4735 | 4758 | 4747 | 4783 | 4807 | 4795 | 4371 | 20,56 |
| D12 | 108 | 12,5 | 12,9 | 12,3 | 11,7 | 11,0 | 4746 | 4781 | 4764 | 4797 | 4819 | 4808 | 4395 | 20,40 |
| D13 | 123 | 11,8 | 11,9 | 11,6 | 10,9 | 10,2 | 4752 | 4776 | 4764 | 4798 | 4819 | 4808 | 4399 | 20,40 |
| D14 | 137 | 11,0 | 10,9 | 10,8 | 9,7 | 9,7 | 4764 | 4800 | 4782 | 4786 | 4815 | 4801 | 4405 | 20,27 |
| D15 | 158 | 12,0 | 12,1 | 11,3 | 9,9 | 9,3 | 4781 | 4802 | 4792 | 4795 | 4815 | 4805 | 4422 | 20,27 |
| D16 | 185 | 12,0 | 12,0 | 11,2 | 10,0 | 9,3 | | | | | | | | |
| D17 | 213 | 11,1 | 11,1 | 10,3 | 9,3 | 8,8 | 4778 | 4793 | 4786 | 4807 | 4839 | 4823 | 4436 | 20,23 |
| D18 | 290 | 9,0 | 9,1 | 8,4 | 7,1 | 6,5 | 4932 | 4945 | 49397 | 4945 | 4905 | 4925 | 4524 | 19,83 |



Ensayo a flexión

Valores obtenidos

| Probeta | Carga ultima | PCTO | MOEGCTO | PEL | MOR | t |
|---------|--------------|-------|---------|-------|-------|-----|
| PS-01-H | 10,99 | 1,903 | 8920 | 0,173 | 14,55 | 120 |
| PS-02-H | 38,09 | 2,138 | 8197 | 0,179 | 59,34 | 287 |
| PS-03-H | 36,36 | 2,084 | 7884 | 0,257 | 39,97 | 272 |
| PS-04-H | 16,69 | 2,657 | 6455 | 0,232 | 25,44 | 141 |
| PS-05-H | 36,82 | 1,879 | 8560 | 0,150 | 54,18 | 278 |
| PS-06-H | 33,67 | 1,703 | 9651 | 0,139 | 50,25 | 254 |
| PS-07-H | 38,44 | 1,535 | 11415 | 0,127 | 59,89 | 383 |
| PS-08-H | 29,70 | 2,221 | 7977 | 0,215 | 46,45 | 231 |
| PS-09-H | 22,71 | 2,212 | 7838 | 0,168 | 35,00 | 185 |
| PS-10-H | 16,49 | 2,018 | 8684 | 0,155 | 25,69 | 146 |
| PS-11-H | | 2,335 | | 0,192 | | |
| PS-12-H | 40,94 | 1,908 | 9387 | 0,158 | 64,72 | 305 |
| PS-13-H | 38,15 | 1,523 | 10561 | 0,130 | 56,14 | 300 |
| PS-14-H | 25,64 | 2,027 | 8555 | 0,156 | 39,51 | 202 |
| PS-15-H | 43,70 | 1,711 | 10354 | 0,129 | 68,33 | 324 |
| PS-16-H | | | | | | |
| PS-17-H | 34,59 | 1,847 | 9489 | 0,157 | 53,89 | 260 |
| PS-18-H | 37,78 | 1,810 | 9791 | 0,150 | 59,08 | 286 |
| PS-19-H | 38,48 | 1,719 | 10198 | 0,144 | 59,95 | 289 |
| PS-20-H | 44,73 | 1,611 | 11243 | 0,137 | 71,50 | 455 |
| PS-21-H | 15,61 | 2,095 | 8275 | 0,193 | 24,06 | 136 |
| PS-22-H | 25,75 | 1,943 | 8732 | 0,172 | 39,11 | 258 |
| PS-23-H | 29,63 | 1,743 | 10623 | 0,141 | 48,06 | 230 |
| PS-24-H | 29,26 | 1,827 | 9093 | 0,140 | 44,16 | 247 |
| PS-25-H | 16,36 | 2,138 | 8110 | 0,175 | 25,21 | 140 |
| PS-26-H | 26,75 | 1,808 | 9694 | 0,157 | 41,67 | 217 |



Valores calculados

| Probeta | MOE g | MOE l | MOE l e | MOE s | MOE f | MOE p | Densidad |
|---------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|----------|
| PS-01-H | 8920 | 8908 | 8890 | 13684 | 13638 | 9200 | 550,5 |
| PS-02-H | 8197 | 8889 | 8866 | 10803 | 11039 | 8100 | 482,8 |
| PS-03-H | 7884 | 5783 | 4827 | 10260 | 9925 | 7300 | 485,6 |
| PS-04-H | 6455 | 6690 | 6007 | 9231 | 9461 | 6700 | 401,5 |
| PS-05-H | 8560 | 9741 | 9973 | 10570 | 10320 | 8100 | 501,3 |
| PS-06-H | 9651 | 10746 | 11280 | 12630 | 12631 | 9700 | 520,1 |
| PS-07-H | 11670 | 12777 | 13920 | 13847 | 13503 | 10900 | 489,6 |
| PS-08-H | 7977 | 7474 | 7026 | 10414 | 10265 | 8300 | 413,2 |
| PS-09-H | 7838 | 9365 | 9484 | 11113 | 10878 | 8100 | 423,6 |
| PS-10-H | 8684 | 10219 | 10595 | 12823 | 13227 | 9100 | 492,7 |
| PS-11-H | 7111 | 7833 | 7493 | 9747 | 10321 | 7200 | 475,2 |
| PS-12-H | 9387 | 10291 | 10688 | 11697 | 11750 | 8400 | 493,9 |
| PS-13-H | 10561 | 11202 | 11873 | 13187 | 13256 | 9700 | 523,4 |
| PS-14-H | 8555 | 10049 | 10374 | 10350 | 10921 | 8100 | 478,3 |
| PS-15-H | 10354 | 12397 | 13427 | 14210 | 14232 | 11300 | 538,1 |
| PS-16-H | | | | 11193 | 11276 | 8500 | 487,8 |
| PS-17-H | 9489 | 10134 | 10484 | 12444 | 12573 | 9600 | 514,7 |
| PS-18-H | 9791 | 10729 | 11257 | 12660 | 12434 | 9300 | 488,6 |
| PS-19-H | 10198 | 10994 | 11602 | 12422 | 12926 | 9300 | 492,0 |
| PS-20-H | 11243 | 11976 | 12878 | 13864 | 13573 | 10200 | 493,6 |
| PS-21-H | 8275 | 8156 | 7913 | 11416 | 11735 | 8300 | 453,2 |
| PS-22-H | 8732 | 8955 | 8951 | 12619 | 12740 | 8900 | 493,7 |
| PS-23-H | 10623 | 11870 | 12741 | 13756 | 13777 | 10400 | 540,3 |
| PS-24-H | 9093 | 10750 | 11285 | 13156 | 13081 | 9300 | 535,5 |
| PS-25-H | 8110 | 8992 | 9000 | 11040 | 11092 | 7900 | 443,6 |
| PS-26-H | 9694 | 10090 | 10428 | 11185 | 11420 | 8400 | 480,3 |